

**UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**  
**Faculdade de Ciências e Tecnologia**

**Departamento de Engenharia Civil**

**Utilização de Ligas com Memória de Forma no controlo  
de vibrações em Estruturas Inteligentes de Engenharia  
Civil**

Por:

**LUÍS ANTÓNIO PEREIRA SEMIÃO**

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil- Estruturas e Geotecnia.

Orientador: Prof. Doutor Corneliu CISMASIU

**LISBOA**  
**2010**



LUÍS ANTÓNIO PEREIRA SEMIÃO

# Utilização de Ligas com Memória de Forma no controlo de vibrações em Estruturas Inteligentes de Engenharia Civil

Data de aprovação:

05 / 01/ 2010

**Jurí:**

**Prof. Dr. Corneliu Cismasiu** (Orientador)  
Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNL

**Prof. Dr. Carlos Chastre Rodrigues** (Arguente)  
Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNL

**Prof. Dr. M. A. Gonçalves da Silva** (Presidente)  
Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNL



## **Agradecimentos**

Um especial agradecimento ao meu orientador de mestrado, Professor Corneliu Cismasiu por toda a ajuda e colaboração, por toda a paciência e compreensão que deu para a elaboração desta dissertação.

Também um especial agradecimento para a Rita, para os meus pais pelo apoio que me deram e também ao professor João Cardoso pela ajuda com a simulação Ansys.



## ***Resumo***

As ligas com memória de forma possuem duas propriedades singulares: a memória de forma e a superelasticidade. A memória de forma, é a capacidade do material recuperar a sua forma original através de uma variação de temperatura. A segunda propriedade destas ligas, e na qual esta dissertação se focará, é a superelasticidade. A superelasticidade é a propriedade termo-mecânica do material que permite a recuperação da forma inicial ao ser cessado o carregamento a que este está sujeito, permitindo recuperar de deformações elásticas na ordem dos 8%, bastante superiores aos materiais regularmente utilizados na construção de edifícios, juntando o facto de nos ciclos de carga e descarga o material dissipar energia. Esta propriedade é extremamente atractiva para o controlo de vibrações sísmicas nos edifícios.

Esta dissertação tem como objectivo o estudo da utilização de ligas com memória de forma (Shape memory alloys) no controlo de vibrações em estruturas inteligentes de engenharia civil através de modulações matemáticas e computacionais que permitem simular o comportamento do material.

Foram estudados 2 modelos constitutivos para o comportamento das ligas com memória de forma: Tanaka e Auricchio. Estes modelos foram analisados recorrendo ao programa Matlab onde foram efectuados simulações num oscilador de um grau de liberdade que provaram que ambos são realistas. Os modelos apresentam como principal diferença a gestão da mudança de fases. O modelo de Auricchio relaciona na suas equações constitutivas a tensão, a deformação e a fracção de fase martensítica, enquanto que o modelo de Tanaka junta o factor temperatura, tornando este último modelo mais completo e realista. Como conclusão verificou-se que no intervalo de frequências 0.01Hz e 4Hz a dissipação se manteve constante.

No último capítulo com o recurso ao programa Ansys e com base no modelo constitutivo de Auricchio foi analisada uma estrutura em pórtico onde foi avaliado o comportamento desta a uma acção sísmica. Como conclusões verificou-se que apesar de a estrutura com recurso a tirantes SMA apresentar valores de deslocamento máximo superiores à estrutura com tirantes de aço, o amortecimento efectuava-se de forma mais célere.

Palavras chave:

Ligas com memória de forma; superelasticidade; controlo passivo de vibrações; modelos constitutivos

## ***Abstract***

Shape memory alloys (SMAs) have two relevant properties: shape memory, as the name indicates, and superelasticity. Shape memory is the ability to return to the original shape upon temperature variation. Super elasticity is a thermodynamic property that allows the material to return to the original shape upon releasing the force on it. The superelasticity property allows 8% of deformation of the material, which is much higher than the elasticity of the materials currently used in building construction. Furthermore, during the load/unloading cycles, the SMAs dissipate energy. This property is therefore extremely attractive for the vibrations control, such as the ones caused by earthquakes.

The main aim of this study was to investigate computationally the use of SMAs to control vibrations in civil engineering smart structures, focusing mainly on the super elasticity property of this alloy.

Two different constitutive models for the behavior of the SMAs were analyzed through Matlab software: Tanaka and Auricchio models, respectively. The study was made on an oscillator with one degree of freedom. Both Tanaka and Auricchio's models are likely to be realistic.

The main difference between the models is the management of phase transformation. In the Tanaka's model the material's behavior is controlled by temperature, whereas in the Auricchio's model the control is by the tension applied. In conclusion, at the frequency intervals of 0.01Hz and 4Hz the energy dissipation is maintained constant.

In the last chapter of the thesis evaluate the behavior of a shear building during a seismic activity using the constitute model of Auricchio with the help of the Ansys software. In conclusion, though the maximum displacement values of the structure supported by SMAs links are higher than with steel links, the damping process seems to occur faster.

### Keywords:

Shape memory alloys, superelasticity, vibration control, constitutive models, Auricchio's model, Tanaka's model



## *Simbologia e notações*

$A_f$	Temperatura final fase austenitica
$A_s$	Temperatura inicial fase austenitica
$C_A$	Calor específico austenitico
$C_M$	Calor específico martensitico
$E_A$	Módulo de elasticidade Austenitico
$E_D$	Área do gráfico tensão/deformação
$e_L$	Deformação elástica
$E_M$	Módulo elasticidade Martensitico
$E_{S0}$	Área do gráfico tensão/deformação entre o ponto e deslocamento máximo e a origem
$M_f$	Temperatura final fase martensitica
$M_s$	Temperatura inicial fase martensitica
$P$	Amplitude da força
SMA	Shape memory alloy (liga com memória de forma)
$t$	Duração da acção
$T$	Temperatura
$\beta$	Coeficiente do método da aceleração média
$\gamma$	Coeficiente do método da aceleração média
$\zeta_{eq}$	Coeficiente de amortecimento viscoso equivalente
$\theta$	Coeficiente de expansão térmica
$\xi$	Fracção martensitica
$\sigma_{A_f}$	Tensão final fase austenitica
$\sigma_{A_s}$	Tensão inicial fase austenitica
$\sigma_{M_f}$	Tensão final fase martensitica
$\sigma_{M_s}$	Tensão inicial fase martensitica
$\omega$	Frequência de excitação



## Epígrafe

No âmbito da Dinâmica de Estruturas, esta dissertação baseia-se no estudo da aplicabilidade das ligas com memória de forma no controlo de vibração em estruturas de Engenharia Civil.

A singularidade destes materiais, com características de dissipação de energia e de elasticidade superiores aos materiais regularmente utilizados apela a um estudo da aplicabilidade dos mesmos em estruturas correntes. A presente dissertação, visa apresentar as ligas com memória de forma e as suas propriedades assim como ilustrar possíveis aplicações no controlo de vibrações em estruturas de engenharia Civil por intermédio de simulações numéricas.



## Índice

<i>Resumo</i> .....	vii
<i>Abstract</i> .....	viii
<i>Simbologia e notações</i> .....	ix
<i>Introdução</i> .....	1
<b>I. INTRODUÇÃO ÀS LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA</b> .....	<b>3</b>
1. <i>Introdução às Ligas com Memória de Forma</i> .....	5
2. <i>As duas fases dos SMAs</i> .....	6
3. <i>Visão Microscópica dos cristais</i> .....	7
4. <i>Relação Fase-Temperatura</i> .....	11
5. <i>Propriedades dos SMAs</i> .....	12
5.1. <i>Superelasticidade</i> .....	12
5.2. <i>Efeito de Memória de Forma</i> .....	13
6. <i>Relação Carregamento/ Temperatura</i> .....	14
7. <i>Características dos Nitinol</i> .....	15
8. <i>Exemplos</i> .....	17
8.1. <i>Memória de Forma:</i> .....	17
8.2. <i>Superelasticidade</i> .....	20
8.3. <i>Isolamento de base recorrendo a componentes SMAs</i> .....	21
<b>II. SIMULAÇÃO MATLAB</b> .....	<b>25</b>
1. <i>Simulação Matlab</i> .....	27
2. <i>Modelo de Auricchio</i> .....	28
3. <i>Modelo de Tanaka</i> .....	31
4. <i>Comparação entre Modelo de Auricchio e Modelo de Tanaka</i> .....	32
4.1. <i>Modelo adoptado</i> .....	32
4.2. <i>Características do modelo</i> .....	33
4.3. <i>Recentramento do modelo</i> .....	35
4.4. <i>Calibração do modelo</i> .....	38
4.5. <i>Testes</i> .....	40
4.6. <i>Coeficiente de amortecimento viscoso equivalente</i> .....	41

<b>III. SIMULAÇÃO ANSYS .....</b>	<b>45</b>
1. <i>Introdução a simulação Ansys .....</i>	<i>47</i>
2. <i>Modelo.....</i>	<i>48</i>
3. <i>Metodologia de simulação .....</i>	<i>49</i>
4. <i>Simulação .....</i>	<i>51</i>
5. <i>Conclusão.....</i>	<i>57</i>
 <i>Referências .....</i>	 <i>59</i>
<i>Mapa de Anexos:.....</i>	<i>63</i>

## Índice de Figuras

Figura 1.1- Visão macroscópica e microscópica das fases de SMAs. Flor. S (2005).....	7
Figura 1.2- Alternância de fases dos SMAs em função de temperatura /tensão. Flor. S (2005) .....	8
Figura 1.3 - Representação gráfica da relação tensão/deformação de SMA. Song, G. (2006).....	9
Figura 1.4 –Ciclo de alternância de fases. Flor. S (2005) .....	10
Figura 1.5 - Relação da alternância de fases com a temperatura. Song, G. (2006) .....	11
Figura 1.6 – Esquema do comportamento super-elástico de uma barra de SMA.....	12
Figura 1.7 – Esquema do efeito de memória de forma .....	13
Figura 1.8 – Evolução temperaturas em função das fases e Tensão .....	14
Figura 1.9 – Viga Reforçada com SMAs .....	18
Figura 1.10 – Resultado da aplicação de SMAs e variação de temperatura numa estrutura em cedência .....	19
Figura 1.11 – Exemplo de uma estrutura porticada contendo tirantes de SMA .....	20
Figura 1.12 – Mecanismo de isolamento de base .....	21
Figura 1.13 – Mecanismo de restrição de movimentos .....	22
Figura 1.14 – Recurso a chumbadouros com elementos SMAs .....	23
Figura 2.1 – Percentagem Martensítica dos SMAs .....	28
Figura 2.2 – Comparação Método numérico/Experimental: Tensão/Deformação (Auricchio et al., 1997).....	30
Figura 2.3 – Modelos utilizados na modelação MathLab .....	32
Figura 2.4 – Modelo optimizado .....	35
Figura 2.5 – Gráficos Velocidade/ Deslocamento .....	35
Figura 2.6 – Modelo SMA – Posição de equilíbrio .....	36
Figura 2.7 – Tensões e deformações de equilíbrio .....	36
Figura 2.8 –Modelo final.....	37
Figura 2.9 –Calibração modelo Auricchio – Tensão/Deformação .....	38

Figura 2.10 –Comparação modelo calibrado com modelo não calibrado .....	39
Figura 2.11 –Força/Deslocamento – Sobreposição de frequências.....	40
Figura 2.12 –Coeficiente de amortecimento viscoso equivalente.....	41
Figura 2.13 –Força/ Deslocamento – Frequências.....	42
Figura 2.14 –Coeficiente de amortecimento viscoso equivalente/Frequência .....	43
Figura 3.1 –Modelo Ansys.....	48
Figura 3.2 – Sismo de Northridge – Acelerograma .....	50
Figura 3.3 – Sismo de Northridge – Sismograma - deslocamento/tempo.....	50
Figura 3.4 –Modelo Ansys – Portico 2 andares sem tirantes.....	51
Figura 3.5 –Time-History – Estrutura sem tirantes.....	52
Figura 3.6 –Modelo Ansys – Portico 2 andares com tirantes de aço.....	53
Figura 3.7- Time-History – Estrutura com tirantes de aço.....	54
Figura 3.8 –Modelo Ansys – Portico 2 andares com tirantes SMA.....	55
Figura 3.9- Time-History – Estrutura com tirantes SMA.....	56
Figura 3.10- Time-History – Sobreposição 3 simulações .....	57



## ***Índice de Tabelas***

Tabela 1.1- Características físicas e mecânicas do Nitinol.....	15
Tabela 1.2 - Temperaturas para o início da fase austenítica.....	16
Tabela 2.1 - Propriedades do modelo .....	33
Tabela 2.2 - Propriedades específicas do modelo de Auricchio .....	33
Tabela 2.3 - Propriedades específicas do modelo de Tanaka.....	34
Tabela 2.4 - Coeficiente de amortecimento viscoso equivalente .....	42



## *Introdução*

Esta dissertação tem como objectivo analisar e estudar a utilização de ligas com memória de forma (denominadas em inglês Shape Memory Alloys ou SMAs) no controlo de vibrações em Estruturas Inteligentes de Engenharia Civil.

A dissertação está dividida em três capítulos:

- Introdução aos SMAs
- Estudo de dois modelos constitutivos alternativos (Tanaka, et al., 1986) e (Auricchio et al., 1997) através de uma modelação no programa Matlab facultada pelo Eng. Filipe Santos (Santos & Cismasiu, 2008).
- Simulação da resposta dinâmica de uma estrutura real, englobando um dispositivo de controlo de vibrações baseado em ligas com memória de forma recorrendo ao programa ANSYS.

O primeiro capítulo é constituído por uma introdução aos SMAs. Estão explicadas as principais características destes materiais, propriedades estas que os tornam tão singulares no ramo da engenharia.

A dissertação assenta sobre as duas principais características dos SMAs: a superelasticidade e a memória de forma, sendo que nesta dissertação será apenas abordada a superelasticidade e avaliada a contribuição que têm para a dissipação de energia nas estruturas.

A principal dificuldade de análise deste tipo de material deve-se ao facto de as propriedades deste variarem em função do carregamento a que está sujeito, originando um comportamento não linear que requer uma análise mais complexa. No segundo capítulo, já a par das características especiais destes materiais, são apresentados dois modelos constitutivos alternativos, um mais simplista, que não toma em conta a variação das propriedades termo-mecânicas do material em função da velocidade da carga e da temperatura (Auricchio et al., 1997), e um outro mais complexo, em que são tidos em conta os factores termo-dinâmicos do carregamento. (Tanaka et al., 1986). Os dois modelos constitutivos são comparados entre si, avaliando-se as limitações de cada um deles.

As simulações numéricas em Matlab apresentadas, servem para analisar várias configurações de dispositivos de dissipação de vibrações baseados em SMAs de modo a identificar a eficiência da utilização deste tipo de materiais. A utilização alternativa dos dois modelos constitutivos e a comparação dos resultados obtidos permite avaliar a fiabilidade do modelo mais simples (Auricchio et al, 1997), permitindo assim mais tarde a sua utilização no terceiro capítulo desta dissertação.

O último capítulo apresenta a simulação numérica em ANSYS da implementação de um sistema de dissipação de vibrações baseado em SMAs numa estrutura de Engenharia Civil sujeita a uma excitação de base.

Este programa software possui na sua biblioteca de materiais um modelo constitutivo para os materiais com memória de forma. Foram efectuados testes comparativos com estruturas com e sem elementos SMAs de forma a avaliar os prós e contras da utilização destes materiais para o controlo de vibrações.

## **I. INTRODUÇÃO ÀS LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA**



## 1. Introdução às Ligas com Memória de Forma

As ligas com memória de forma (denominadas em inglês Shape Memory Alloys ou SMAs), fazem parte do grupo dos materiais inteligentes (Smart Materials), entre os quais se encontram também os materiais piezocerâmicos, os fluidos magneto-reológicos (MR) e os fluidos electro-reológicos (ER) (Seelecke, 2002). Esta dissertação foca apenas os SMAs.

Os SMAs são caracterizados por duas propriedades termo-mecânicas singulares. Uma delas, que é evidente no próprio nome destes materiais (*shape memory*), é a memória de forma (Duerig, 1990). Esta propriedade consiste na recuperação da forma original do material após este ter sido deformado devido a acções exteriores. Ao entrar no regime plástico existe uma grande dissipação de energia no sistema, e ao contrário dos metais e ligas mais usados e conhecidos, onde após a criação de rótulas plásticas existe uma deformação plástica irreversível que irá condicionar o comportamento do material em acções posteriores, no caso dos SMAs, é possível retomar a forma inicial do material sem que haja perdas de tensão resistente ou sem que as características do material fiquem de alguma forma afectadas ou alteradas. A recuperação da configuração inicial do material é obtida através de variações de temperatura. Este ciclo pode ser repetido inúmeras vezes sem que as propriedades do material se alterem.

A outra propriedade termo-mecânica dos SMAs de grande interesse para aplicações técnicas é a superelasticidade (Duerig, 1990). Esta propriedade resulta do rearranjo interno dos cristais da liga que confere a esta uma recuperação elástica superior aos dos metais e ligas normalmente utilizados, possibilitando ainda ao material dissipar energia entre os ciclos. Nos SMAs a recuperação elástica atinge valores na ordem dos 8% contrastando com 0,2% das ligas comuns, o que representa um acréscimo significativamente considerável.

De entre os vários SMAs, Cobre-Zinco-Alumínio-Níquel, Cobre-Alumínio-Níquel e Níquel-Titânio, será apenas abordada a liga Níquel-Titânio uma vez que apresenta melhores características mecânicas face às ligas com base no Cobre.

Deste ponto para a frente, sempre que for referido SMA está-se a referir à liga Níquel-Titânio (Ni-Ti) também conhecida como Nitinol.

## ***2. As duas fases dos SMAs***

Existem duas fases de configuração e rearranjo interno dos cristais dos SMAs (Duerig, 1990): a austenite, fase mais forte, estável a altas temperaturas, e a martensite, fase mais fraca, estável a baixas temperaturas. A diferença entre estas fases encontra-se na organização e estrutura dos cristais.

A alternância destas fases distintas e com comportamentos diferentes, conferem a este tipo de ligas propriedades únicas. Esta alternância pode ser feita através da indução de forças ou da variação de temperatura, sendo que ao primeiro fenómeno se dá o nome de **Superelasticidade** e ao segundo **Efeito de Memória de Forma**.

### **Fase austenítica:**

A austenite é considerada a fase forte dos SMAs. Nesta fase, a estrutura dos cristais tem uma forma quadrangular, mais compacta e regular (Duerig 1990) restringindo os movimentos no seu interior, o que impede que hajam grandes deformações e também que estas sejam permanentes (ver Figura 1.1). Pode-se assim dizer que a fase austenite é uma fase puramente elástica.

### **Fase martensítica:**

A martensite é considerada a fase mais fraca dos SMAs. Nesta fase, a estrutura dos cristais encontra-se organizada em forma de paralelogramo (ver Figura 1.1). Este rearranjo dos cristais dá origem a uma maior deformação do material para uma menor tensão, fazendo com que o material plastifique facilmente.



### 3. Visão Microscópica dos cristais

A Figura 1.1 apresenta as duas fases dos SMAs. No lado esquerdo da Figura 1.1 encontra-se a fase mais estável e mais resistente, a fase austenite. Nesta fase, como é possível observar na visão microscópica, a estrutura molecular encontra-se com uma forma quadrangular regular, oferecendo maior resistência a possíveis deformações. Tanto na visão microscópica como macroscópica, a estrutura mantém-se inalterável quando sujeita a carregamentos (Saadat et al, 2002).

Na imagem central temos a fase de transição entre a austenite e a martensite, chamada de martensite maclada. Nesta fase, devido a um carregamento ou variação de temperatura, a estrutura interna da liga é alterada microscópicamente, ficando com um rearranjo em forma alternada (como é possível observar na Figura 1.1), que apesar de permitir deformações na estrutura, estas permanecem sempre dentro do regime elástico.

A fase martensítica maclada é a grande responsável pela superelasticidade uma vez que ao ser interrompido o carregamento ou a indução de temperatura, a estrutura tem capacidade de recuperar para a sua fase austenítica regressando assim à sua configuração original.

Na imagem da direita temos a fase martensítica no seu estado deformado, onde a estrutura, após passar pela fase de transição martensite maclada, ao continuar a ser carregada, atinge um limite onde a estrutura molecular sofre uma nova alteração, passando de uma estrutura em forma alternada para uma estrutura em forma de paralelogramo.

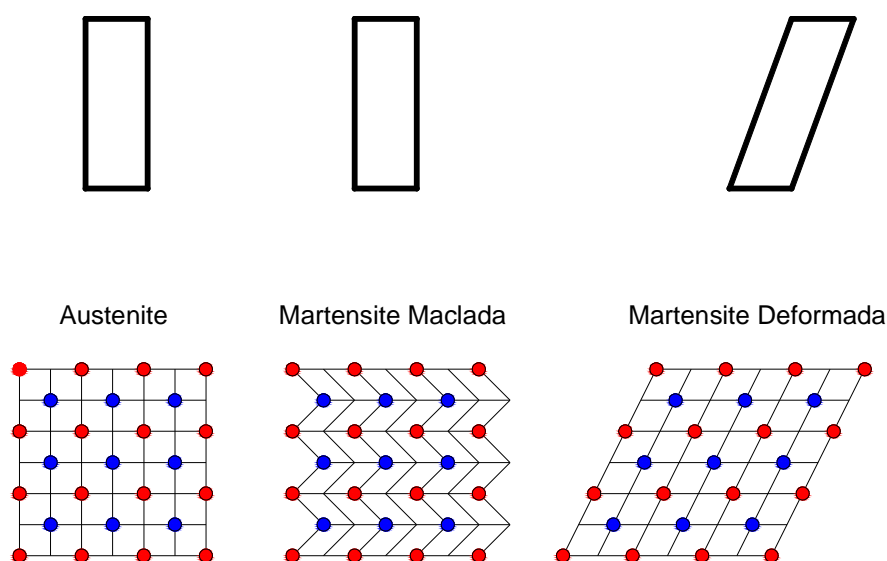


Figura 1.1- Visão macroscópica e microscópica das fases de SMAs. Flor. S (2005)

No esquema apresentado na Figura 1.2 é possível observar a alternância de fases, numa liga com memória de forma (Saadat et al., 2002).

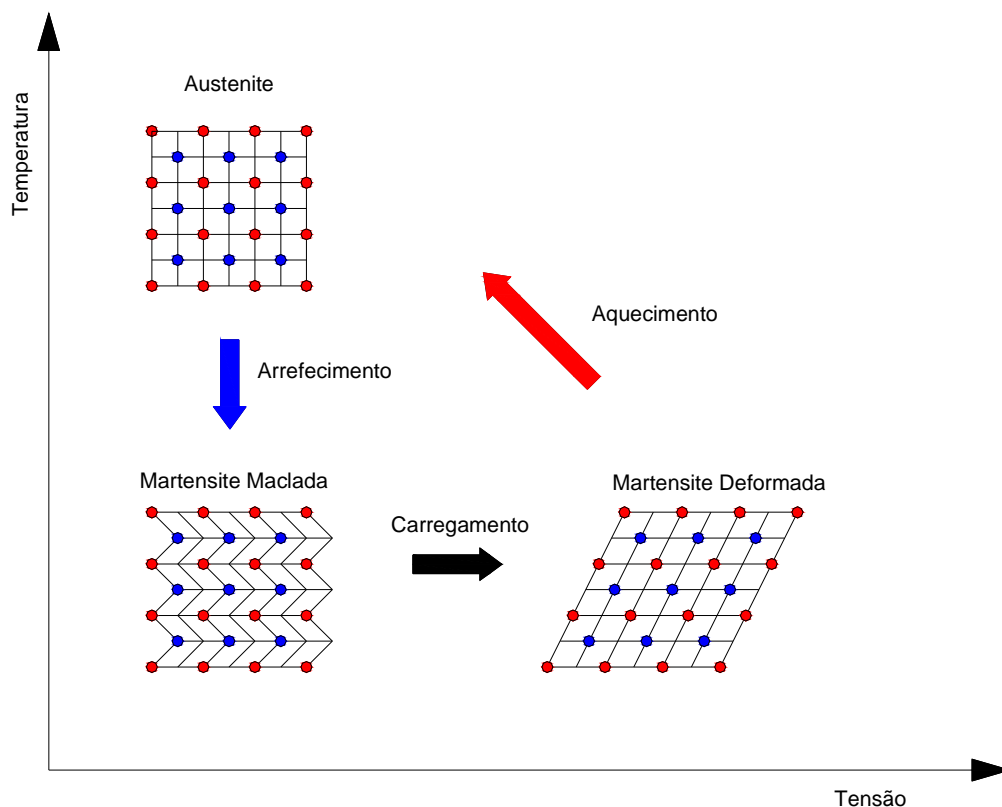


Figura 1.2- Alternância de fases dos SMAs em função de temperatura /tensão. Flor. S (2005)

O esquema relaciona os dois factores que podem fazer com que haja alternância de fase: a temperatura e a tensão.

Considerando que o ciclo tem início na fase austenite, observa-se que ao sofrer um arrefecimento a liga entra no estado de transição chamado martensite maclada (esta mudança de fase também poderá ser obtida através de um aumento da tensão). Apesar de na visão microscópica existirem alterações na estrutura do material, na visão macroscópica estas alterações não são visíveis ao nível de deformações. Se o carregamento for interrompido, e o material não tiver atingido a fase martensítica, este retornará à fase austenítica e recuperará a sua forma inicial.

Se o carregamento for tal que seja atingida a fase martensítica, a liga entrará em plastificação, sendo ainda possível a recuperação do seu estado inicial sob a acção de temperatura.

No gráfico em baixo (Figura 1.3) é possível observar a relação entre a tensão e a deformação, assim como o início e fim das fases austenítica e martensítica.

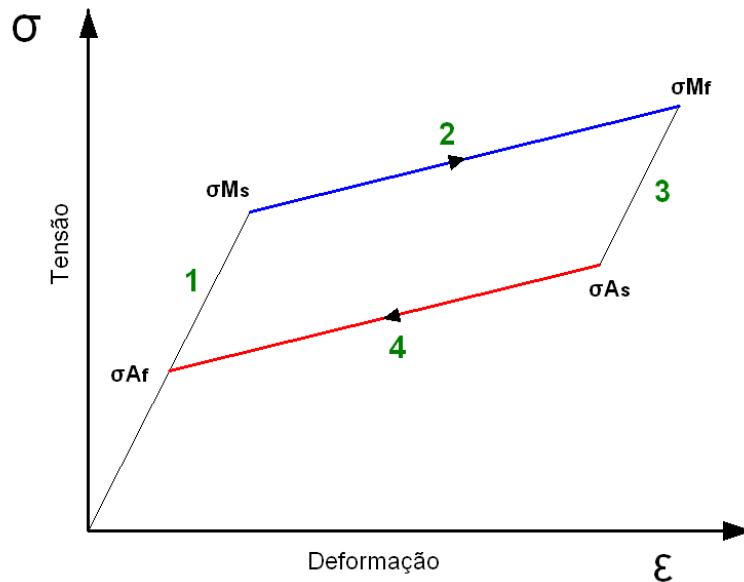


Figura 1.3 - Representação gráfica da relação tensão/deformação de SMA. Song, G. (2006)

É possível observar o início da deformação que é elástica. Neste troço 1, o material encontra-se na fase austenítica. Ao atingir a tensão de início da transformação directa,  $\sigma_{Ms}$ , dá-se início à transformação da estrutura do material, que passa de austenite para martensite (troço 2). Nesta transformação as deformações vão aumentando à medida que a tensão se vai aproximando da tensão  $\sigma_{Mf}$ , tensão esta onde o material atinge a fase martensite.

Tendo um comportamento não linear, o caminho de carga não é o mesmo da descarga, levando a que em cada ciclo gerado o sistema possa dissipar energia (correspondente à área do gráfico gerada entre o caminho de carga e descarga), conferindo a este material qualidades únicas de amortecimento e dissipação de energia.

O que confere a este material uma elasticidade na ordem dos 8% é então o percurso 1 e 2 do gráfico, onde, apesar de em 2 estar a ocorrer uma modificação interna no rearranjo molecular, se for retirada a carga a que o material está sujeito ele retorna à sua configuração inicial pelo caminho 3 e 4 do gráfico.

Na figura 1.4 é possível observar-se o efeito de memória de forma e superelasticidade, e o efeito que carregamentos e variações de temperatura têm nos SMAs. Ao solicitar o material ele responderá seguindo os caminhos 1 e 2 atingindo a fase martensite no final. Se após atingida esta fase o material continue a ser solicitado, ele continuará a deformar e entrará num regime elasto-plástico. Ao ser retirado o carregamento o material recuperará em parte da deformação, seguindo pelo caminho 3 do gráfico, mantendo no entanto uma deformação plástica. Esta deformação plástica é recuperável perante a introdução de uma variação de temperatura, regressando pelo caminho 4 até à forma inicial (Song, 2006).

A dissipação de energia conseguida com este ciclo é bastante superior à do ciclo super-elástico, e corresponde à área do gráfico azul gerada pelo caminho 1 a 4 e de 4 à origem. No entanto, se por um lado no caminho 1 a 3 ao ser cessada a acção exterior o sistema dissipa energia de forma passiva, ao ser induzida uma energia térmica exterior para que este regresse à sua posição inicial faz com que se entre num sistema activo, bastante mais complexo no que diz respeito ao controlo de vibrações. Podendo tirar partido das propriedades termo-mecânicas do material, e visto que o ciclo gerado pelo gráfico a azul na figura 1.4 apresenta uma melhor performance de dissipação de energia, é possível através de um controlo inteligente do material maximizar o rendimento de energia dissipada por ciclo. Este controlo inteligente irá gerir a temperatura do material, aumentando ou reduzindo a temperatura deste de forma a que possam ser atingidas as temperaturas críticas que permitirão uma mudança de fase.

Apesar do elevado interesse científico que os sistemas activos apresentam para o controlo de vibrações e dissipação de energia, o tema não será abordado nesta dissertação.

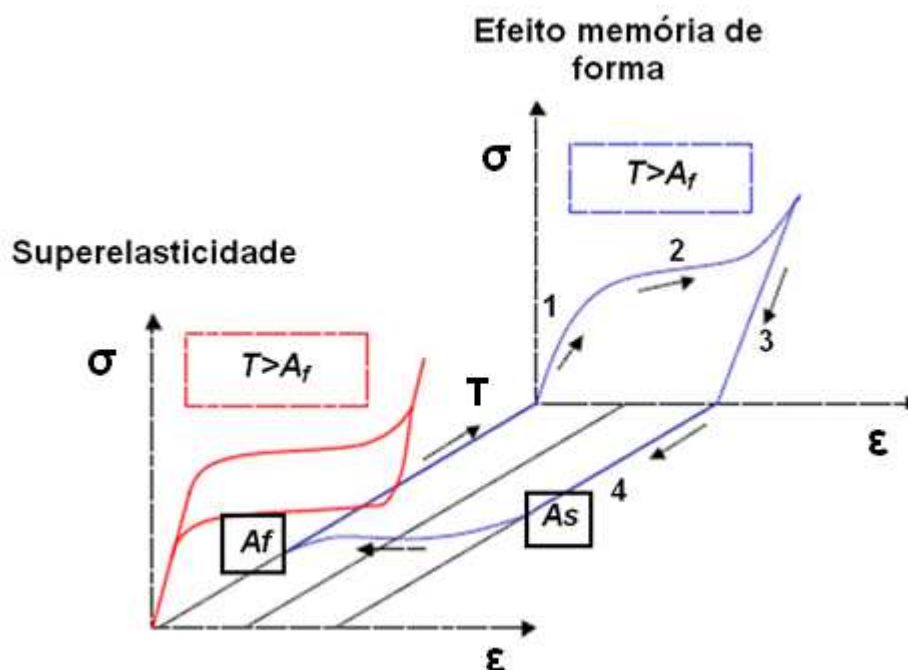


Figura 1.4 –Ciclo de alternância de fases. Flor. S (2005)

#### 4. Relação Fase-Temperatura

Na Figura 1.5 é apresentada a relação entre a fracção martensítica  $\xi$  e a temperatura  $T$ . Este gráfico encontra-se directamente ligado ao gráfico da Figura 1.3, onde em função das mudanças de fase é atribuída uma percentagem de fase martensítica. A fracção martensítica  $\xi$  toma valores entre 0 e 1, sendo que 1 corresponde à fase martensítica e que 0 corresponde à fase austenítica.

Situando a Figura 1.5, pode-se dizer que o valor nulo de fase martensítica corresponde ao caminho 1 (fase austenítica) da Figura 1.3, e que a percentagem máxima (uma unidade) corresponde ao percurso 3 (fase martensítica) do gráfico da Figura 1.3. A percentagem martensítica  $\xi$  apresenta uma elevada importância na elaboração dos modelos constitutivos que serão abordados mais à frente nesta dissertação.

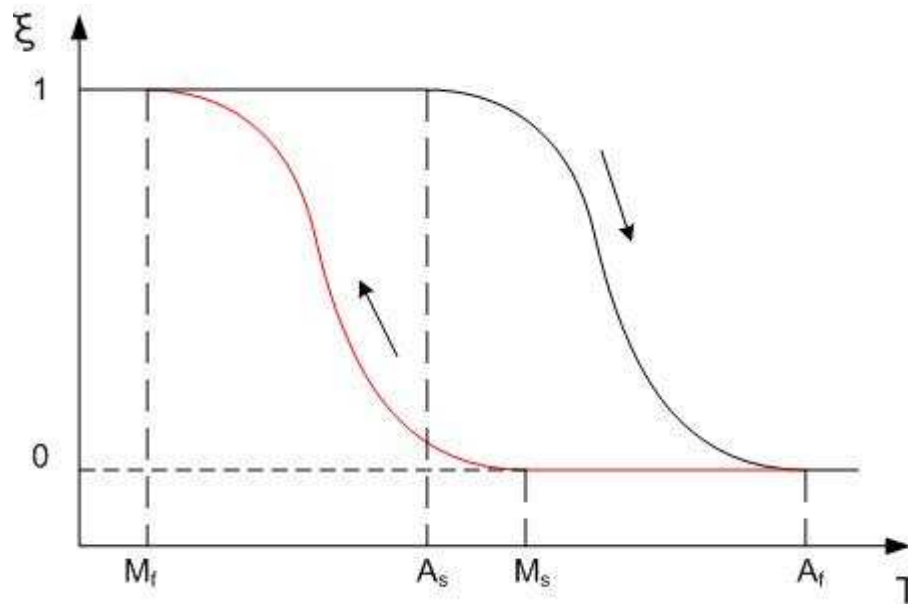


Figura 1.5 - Relação da alternância de fases com a temperatura. Song, G. (2006)

As outras grandezas representadas no gráfico são:

- $M_s$  Temperatura em que se inicia a fase martensite
- $M_f$  Temperatura em que é atingida a fase martensite
- $A_s$  Temperatura em que se inicia a fase austenite
- $A_f$  Temperatura em que é atingida a fase austenite

O percurso a vermelho no gráfico da Figura 1.5 é considerado a transformação directa, que corresponde à alternância de fases austenite/martensite, sendo que o percurso a preto é considerado a transformação inversa correspondendo a alternância martensite/austenite.

## 5. Propriedades dos SMAs

### 5.1. Superelasticidade

Numa breve definição a superelasticidade é a propriedade termo-mecânica do material que permite a recuperação da forma inicial ao ser retirado o carregamento a que este está sujeito, podendo recuperar de deformações na ordem dos 8% e dissipando energia em cada ciclo.

A grande diferença entre a superelasticidade e a elasticidade deve-se ao facto de na última, a descarga seguir o mesmo caminho da carga, enquanto que na superelasticidade os caminhos de carga e descarga não são os mesmos, devido à alternância de fases austenítica/martensítica em que é gerado um ciclo de dissipação, permitindo assim dissipação de energia sem deformação final.

Para exemplificar este fenómeno, considerou-se uma barra encastrada na sua base e com extremidade livre. Ao ser aplicada uma carga na extremidade livre, esta faz com que a barra inicie a sua deformação.

Devido ao fenómeno da elasticidade, ao ser retirada a carga a barra retorna à sua configuração inicial, sem que haja deformações residual.

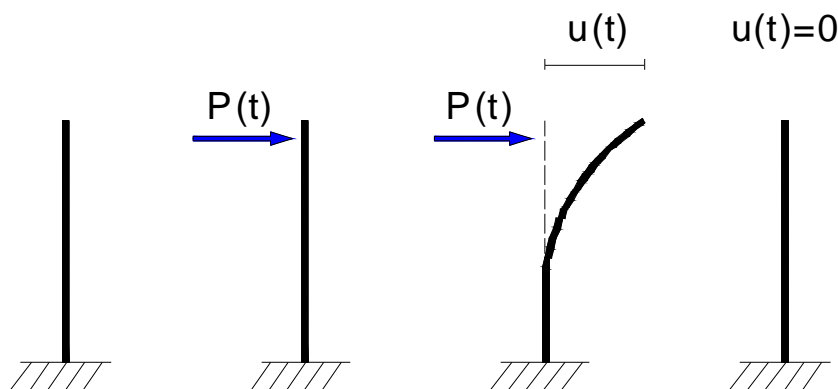


Figura 1.6 – Esquema do comportamento super-elástico de uma barra de SMA

Se por um lado todos os materiais possuem uma fase em que o comportamento é elástico e o fenómeno em cima apresentado se verifica, o que faz dos SMAs materiais excepcionais são os valores de deformação, a capacidade de dissipação de energia e a respectiva recuperação de forma que estes conseguem apresentar, chegando a valores impressionantes de 8% comparando com 3% de um aço otimizado e 0,2% de um aço comum.

## 5.2.Efeito de Memória de Forma

Numa breve definição para o caso dos SMAs, o efeito de memória de forma é o retorno à forma original de um material mediante a variação de temperatura.

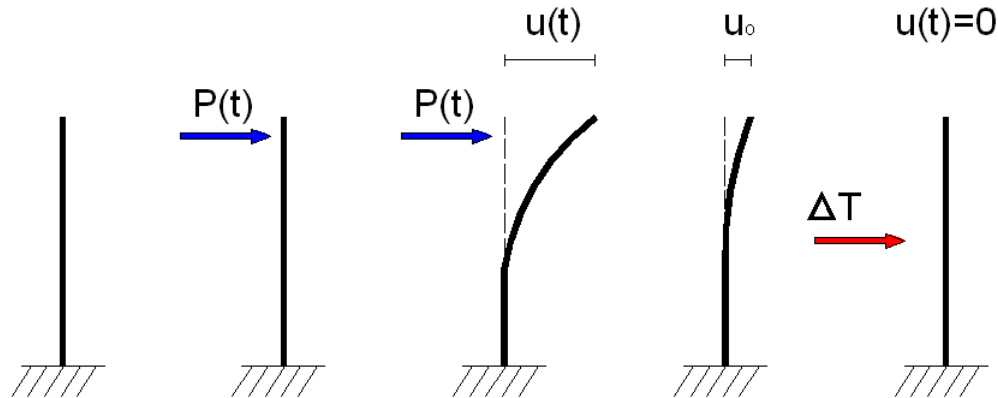


Figura 1.7 – Esquema do efeito de memória de forma

Ao considerar-se novamente o exemplo da barra encastada na base e com a outra extremidade livre, volta-se a sujeitar a extremidade livre a um carregamento lateral. A barra iniciará a sua deformação em tudo igual à apresentada no exemplo da superelasticidade, mas acima de um determinado valor de tensão, a barra entra em regime plástico. Ao contrário do fenómeno da superelasticidade, ao retirarmos o carregamento a barra não irá regressar à sua forma original devido à deformação plástica que ocorreu, dando origem a uma deformação residual.

A barra irá recuperar apenas parte da deformação a que foi sujeita. No entanto, devido ao efeito de memória de forma, ao ser introduzida uma variação de temperatura no sistema suficientemente grande para que este passe da fase martensite para a austenite, a estrutura irá recuperar a sua forma inicial. Relativamente à dissipação de energia, o sistema irá beneficiar da deformação plástica ocorrida que lhe permitirá dissipar mais energia em comparação com o fenómeno da superelasticidade.

## 6. Relação Carregamento/ Temperatura

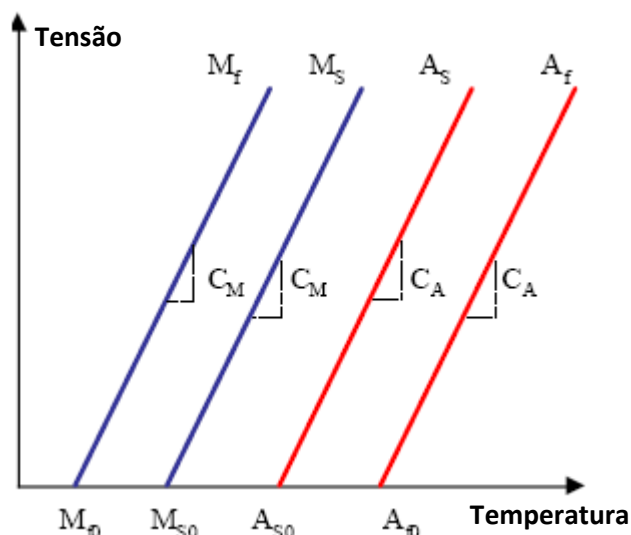


Figura 1.8 – Evolução temperaturas em função das fases e Tensão

A Figura 1.8 representa a relação das várias fases do SMA em função da temperatura e do carregamento.

No eixo das abcissas encontra-se a temperatura em que se inicia cada mudança de fase do SMA, e no eixo das ordenadas a tensão do carregamento. Sendo que as mudanças de fase dos SMAs podem ser alcançadas tanto com indução de esforços ou temperatura, este gráfico permite obter a temperatura de mudança de fase para um determinado valor de tensão.

Pode ser observado no gráfico que a temperatura varia em função do carregamento, levando a que a temperatura ambiente influencie o comportamento do material e por conseguinte a capacidade dissipadora deste. Um outro factor que deverá ser tido em conta é o facto de ao ser solicitado, o material gerará ou absorverá calor do meio envolvente através de reacções endo/exotérmicas, fazendo com que a temperatura não seja constante ao longo do carregamento, influenciando como foi já referido a capacidade dissipadora do material.

No entanto ao ser considerada uma análise estática, em que o carregamento é efectuado de uma forma lenta, pode-se admitir a hipótese que o material tem capacidade de interagir com o meio envolvente, fazendo trocas de calor com o mesmo, levando a que não ocorram mudanças significativas de temperatura no material.



## 7. Características dos Nitinol

Entre as ligas com memória de forma, a mais utilizada em aplicações de engenharia civil é a liga de Níquel-Titânio, conhecida também como Nitinol, cujas características termo-mecânicas são apresentadas na Tabela 1.1.

Tabela 1.1- Características físicas e mecânicas do Nitinol

Temperatura de fusão	1300	°C
Densidade	6.45	g/cm <sup>3</sup>
Resistividade austenite	≈ 100	μΩ cm
Resistividade martensite	≈ 70	μΩ cm
Condutividade térmica austenite	18	W/(cm °C)
Condutividade térmica martensite	8.5	W/(cm °C)
Resistência corrosão	similar às ligas Ti	
Módulo de elasticidade austenite	≈ 80	GPa
Módulo de elasticidade martensite	≈ 20 a 40	GPa
Tensão característica austenite	190 a 700	MPa
Tensão característica martensite	70 a 140	MPa
Tensão ultima de cedência	≈ 900	MPa
Temperatura de transformação	-200 a 110	°C
Deformação com memória de forma	8.5	%

SAES Getters Group, 2009

Alterando a relação Ni/Ti é possível alterar o comportamento deste tipo de ligas, de forma a que estes melhor se adaptem às nossas necessidades, respondendo melhor à superelasticidade ou à memória de forma (Song, 2006).

A título de exemplo, e como poderá ser consultado no **Anexo I** desta dissertação (onde são apresentadas as características das ligas nitinol da gama de comercialização do fabricante “SAES Getters Group”), existem várias configurações da relação Ni/Ti que permitem que uma liga inicie a fase austenítica a temperaturas mais baixas, conferindo-lhe um melhor comportamento super-elástico. (SAES Getters Group, 2009).

## Temperaturas para o início da fase austenítica:

Tabela 1.2 - Temperaturas para o início da fase austenítica

Ligas de Memória de Forma
$A_s = +95^{\circ}\text{C}$
$A_s = +70^{\circ}\text{C}$
$A_s = +60^{\circ}\text{C}$
$A_s = +55^{\circ}\text{C}$
$A_s = +45^{\circ}\text{C}$
Ligas Super-Elasticas
$A_s = -25^{\circ}\text{C}$
$A_s = -50^{\circ}\text{C}$

SAES Getters Group, 2009

Como é possível observar na Tabela 1.2, para um melhor comportamento de superelasticidade verifica-se que o início da fase austenítica ( $A_s$ ) se inicia a temperaturas muito mais baixas que para um melhor comportamento de Memória de forma. Enquanto que para superelasticidade o início da fase austenítica se inicia entre  $-25^{\circ}\text{C}$  e  $-50^{\circ}\text{C}$ , para memória de forma estas temperaturas variam entre  $+45^{\circ}\text{C}$  e  $+95^{\circ}\text{C}$ .

No entanto estes são apenas valores otimizados para os fins pretendidos pelo fabricante “SAES Getters Group”, que apesar de serem otimizados por exemplo para Memória de Forma não implica que não apresentem um bom comportamento de superelasticidade.

A razão desta diferença de temperaturas relaciona-se com o facto de que para ter um melhor comportamento de memória de forma o material deve estar na sua fase martensítica ou atingi-la mais cedo, entrando assim em deformação plástica o que cria uma grande dissipação de energia, daí as temperaturas de início da fase austenite serem mais elevadas, garantido que o material à temperatura ambiente se encontra na sua fase martensite.

No caso da superelasticidade, é necessário garantir que o material aproveita toda a sua fase austenítica, de forma a poder atingir posteriormente a fase martensítica, sem que esta entre em regime plástico, garantindo assim que existe uma dissipação de energia sem que haja deformação plástica residual.

## 8. Exemplos

Devido ao custo e complexidade de aplicação comparando com os materiais correntes, a utilização da liga Nitinol não é muito frequente, no entanto em casos excepcionais como recuperação de edifícios ou estruturas com elevado interesse histórico ou no caso de edifícios singulares, o recurso a SMAs pode ser muito vantajoso.

De seguida são apresentados alguns exemplos de aplicações de ligas com memória de forma em estruturas reais de engenharia civil. Os exemplos serão agrupado em aplicações que tiram partido do efeito da memória de forma e aplicações que tiram partido da superelasticidade.

### 8.1.Memória de Forma:

O primeiro exemplo apresenta uma viga de betão armado, com a particularidade de na sua armadura inferior possuir elementos SMAs. Esta viga, ao ser solicitada, irá tender a deformar como uma viga regular de betão armado, em que o aço atingirá a sua tensão máxima elástica e entrará numa deformação plástica em que não retornará à sua forma inicial.

Numa estrutura de betão armado, a recuperação de deformações é sempre uma tarefa bastante complicada, se não impossível. Ao serem utilizados na armadura inferior elementos SMAs, mediante a introdução de uma variação de temperatura suficiente para o material passar da fase martensítica em que se encontra deformado, para a fase austenítica, o material tenderá a recuperar a sua forma inicial, fazendo com que a viga tenda também ela a recuperar a sua forma inicial o que levará ao fecho das fendas (Sakai et al., 2003).

Neste exemplo (Sakai et al., 2003) verificou-se que após atingida a deformação máxima, a viga de betão armado com elementos SMAs consegue recuperar um décimo mais que a deformação obtida para uma viga de betão armado normal. Verificou-se que a gama de deformações na viga com elementos SMAs é sete vezes superior a uma viga normal. Como pontos negativos verificou-se que podem surgir mais facilmente fendas no betão nas zonas traccionadas na viga com elementos SMA devido a permitir maiores deformações que uma viga normal. Na Figura 1.9 pode ser observado o esquema deste exemplo.

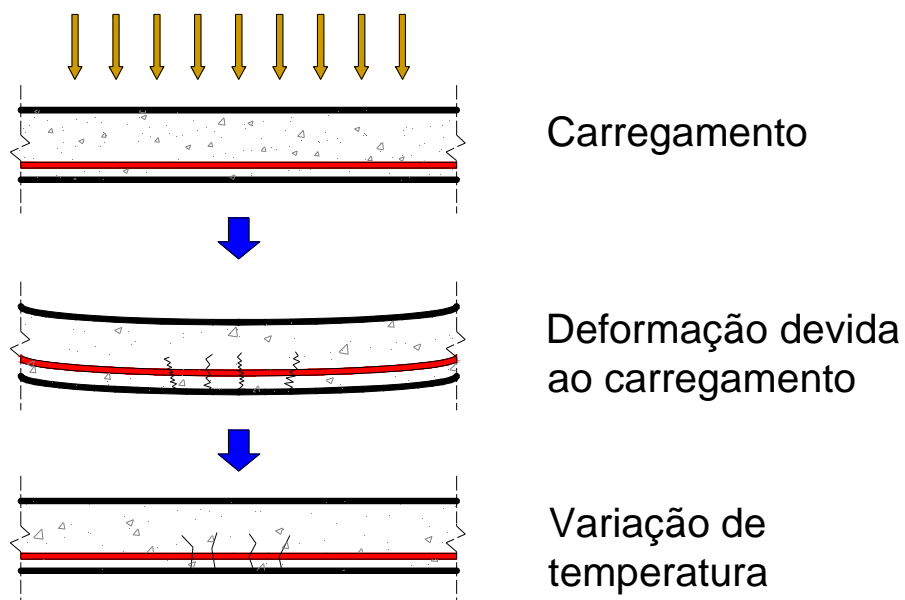


Figura 1.9 – Viga Reforçada com SMAs

Outra situação onde a aplicação de SMAs é bastante eficiente e contorna muitos dos problemas existentes com as técnicas actualmente usadas é a do pré-esforço.

A grande dificuldade do pré-esforço deve-se sobretudo com incapacidade de aplicar simultaneamente a mesma tensão em todos os cabos. Esta incapacidade leva a que os primeiros cabos em que se aplica o pré-esforço tendam a “afrouxar”, o que resulta numa tensão final diferente nos cabos.

Este problema pode ser em alguns dos casos contornado com a introdução de cabos de pré-esforço contendo elementos SMA, onde sabemos inicialmente qual vai ser a resposta do cabo à temperatura aplicada e onde será dispensada a utilização de potentes macacos para aplicação de pré-esforço. Devido à facilidade de introdução de calor na estrutura através de aparelhos de mais fácil utilização que os macacos de pré-esforço (Indirli, M. (2001), consegue-se ter a mesma tensão em todos os cabos aplicada simultaneamente.

A reabilitação e restauração de edifícios históricos também é um campo onde os SMAs são bastantes eficientes e já com provas concretas em casos reais, como é o caso da reabilitação da torre do sino da Igreja de S. Giorgio que ficou bastante danificada após o sismo ocorrido a 15 Outubro de 1996.

A solução tradicional para a reabilitação de edifícios históricos como este passa normalmente pela introdução de reforços localizados de tirantes de aço, que permitem aumentar a estabilidade e a ductilidade. No entanto este tipo de técnicas nem sempre produz os resultados pretendidos, sendo que na Igreja de S. Giorgio optou-se por uma solução inovadora com o recurso a tirantes superelásticos SMA.

Depois da introdução de elementos SMAs na sua estrutura foi possível a sua reabilitação total (DesRoches et al., 2002). O procedimento aplicado neste caso está apresentado esquemático na Figura 1.10. À estrutura em cedência foram introduzidos cabos verticais de NiTi, devidamente ancorados. Em seguida foi introduzida uma variação de temperatura, provocando uma acção de restituição da posição inicial, fazendo com que esta regressa-se praticamente à sua posição original.

Tendo a Igreja sido fustigada novamente por um sismo 6 anos mais tarde, com o mesmo epicentro e de magnitude comparável, verificou-se que a Igreja não apresentou nenhum tipo de dano, comprovando a boa capacidade de controlo de vibrações por parte dos elementos SMAs presentes na estrutura.

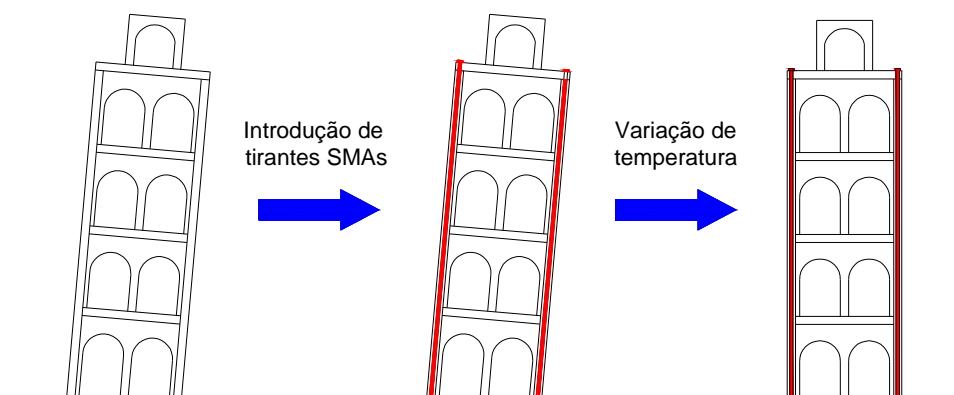


Figura 1.10 – Resultado da aplicação de SMAs e variação de temperatura numa estrutura em cedência

## 8.2. Superelasticidade

Uma das utilizações mais recorrentes e mais estudada da aplicação de elementos SMAs em engenharia civil é o reforço de estruturas recorrendo a tirantes de ligas SMAs. Nesta situação os tirantes são aplicados como os tirantes regularmente usados de aço, mas enquanto nos tirantes de aço estes servirão apenas para controlar os deslocamentos horizontais da estrutura com um custo do aumento da rigidez da mesma, no caso dos SMAs existe a grande vantagem da capacidade de dissipar energia entre os ciclos de oscilação. O recurso a materiais SMAs neste caso poderá também levar a uma redução da rigidez da estrutura em comparação com os tirantes de aço, uma vez que os SMAs possuem um módulo de elasticidade inferior ao aço.

Na Figura 1.11, é possível observar um exemplo de um pórtico de dois andares reforçado com tirantes SMAs (Han et al, 2003). Neste exemplo foram testados dois pórticos com 2m de altura sujeito a uma excitação de base, sendo que um deles utilizava tirantes SMA e o segundo tirantes de aço. Como conclusões verificou-se que a estrutura com tirantes SMA conseguiu reduzir mais rapidamente os movimentos causados pela excitação aplicada, obtendo como tal uma melhor capacidade de dissipar energia.

Existem também estudos de sistemas activos de controlo de vibrações onde as características dos materiais SMA são geridas electronicamente (aquecendo ou arrefecendo os elementos SMA) de forma a melhor se adaptarem à acção a que a estrutura é sujeita.

Uma vez que é possível alterar as propriedades das ligas SMA com indução de temperatura, e por conseguinte a sua resposta em relação à acção, é possível obter uma optimização da resposta dos materiais SMAs conseguindo assim uma dissipação de energia ainda maior.

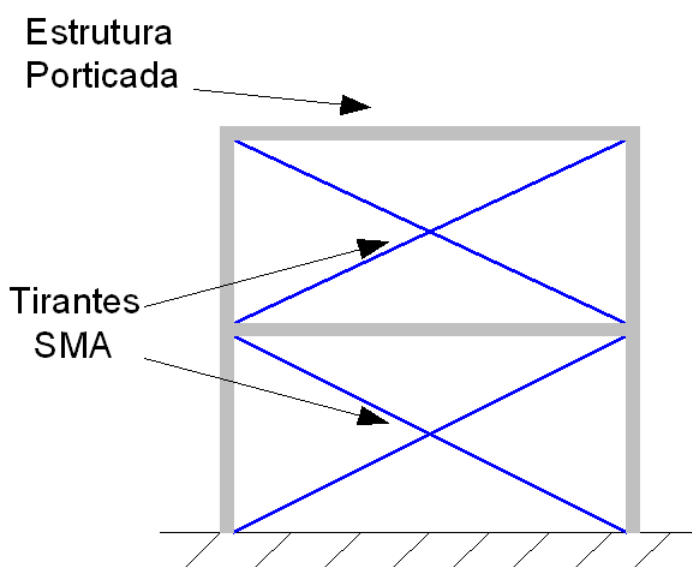


Figura 1.11 – Exemplo de uma estrutura porticada contendo tirantes de SMA

### 8.3. Isolamento de base recorrendo a componentes SMAs

À semelhança da aplicação de tirantes em estruturas porticadas, este tem sido um dos casos mais estudados para a aplicação de elementos SMAs.

Neste caso, o objectivo é criar um isolamento de base, em que os elementos SMAs servirão não só para recentrar o edifício em relação à sua base como também para dissipar energia através das suas propriedades de superelasticidade. A Figura 1.12 representa um edifício onde foram usados cabos de elementos SMA, em que o isolamento de base obtém um melhor desempenho devido à presença de elementos dissipadores de energia no sistema de recentramento da estrutura, permitindo assim que parte da energia que é fornecida ao sistema seja dissipada nos próprios tirantes. Um estudo mais aprofundado desta aplicação de SMAs pode ser encontrado nas referências (Dolce et al., 2000) (Dolce et al., 2001) (Clark et al., 1995).

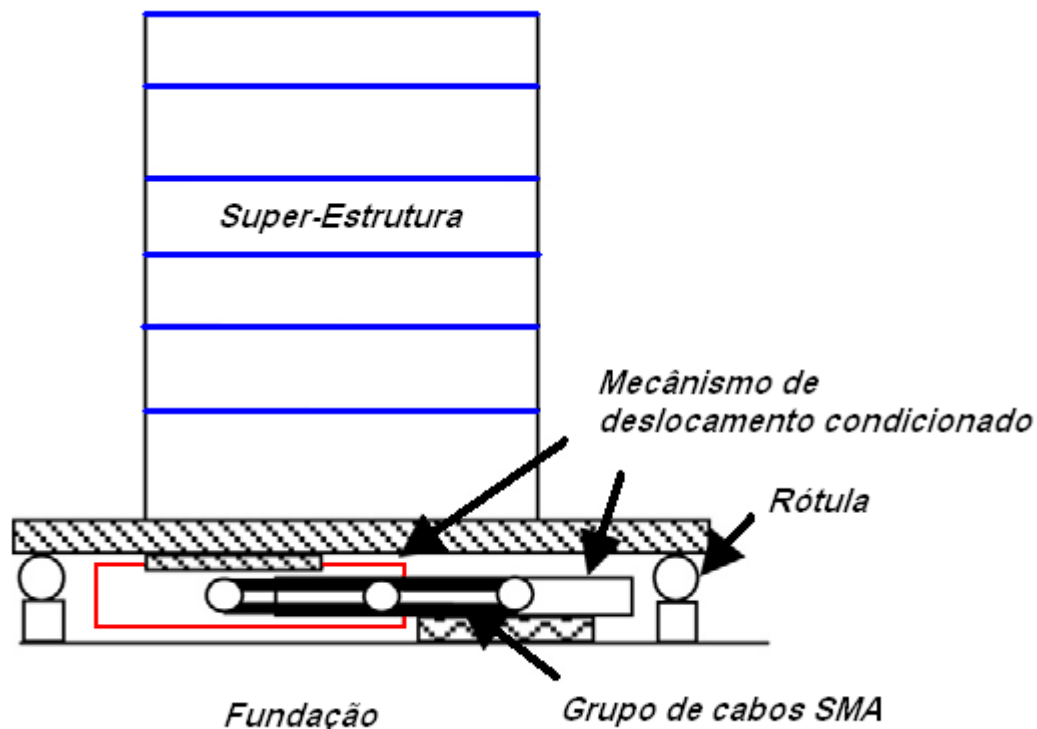


Figura 1.12 – Mecanismo de isolamento de base

Um outro exemplo que assenta no princípio da restrição de movimentos foi o caso estudado por DesRoches (DesRoches & Delemont, 2002). Neste exemplo, que pode ser observado na Figura 1.13, é utilizado um tirante SMA para restringir os movimentos do tabuleiro. Sendo que o tabuleiro permite deslocamentos horizontais, estes encontram-se limitados pelo tirante, que faz a ligação da viga do tabuleiro ao apoio.

DesRoches realizou os seus testes em modelos de escala real, tendo os resultados sido comparados com um modelo semelhante mas sem recurso a materiais SMA. Como conclusões verificou-se que comparando o sistema de movimento condicionado de SMA com um de cabos de aço, o de SMA conseguiu reduzir mais eficazmente os deslocamentos impostos. A grande elasticidade dos SMAs permite aos tirantes SMA grandes deformações permanecendo sempre na sua fase elástica, levando a que consiga dissipar energia entre ciclos sem plastificar.

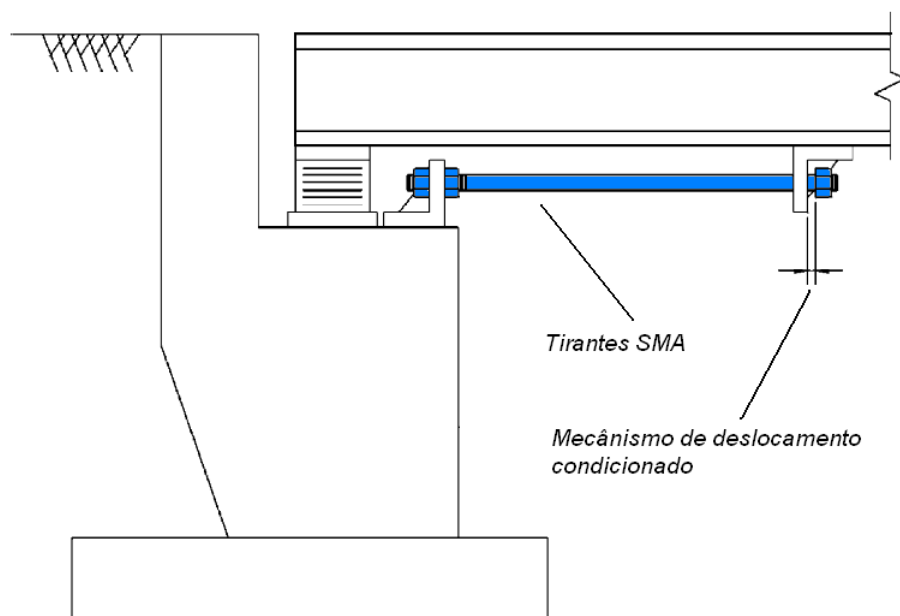


Figura 1.13 – Mecanismo de restrição de movimentos



Outro exemplo recorrente de aplicação de elementos SMAs é a utilização de cavilhas e parafusos em chumbadouros de colunas metálicas (Tamai, Kitagawa, 2002).

Quando sujeita a uma aceleração de base, o ponto crítico da estrutura é na maior parte das vezes a ligação entre o solo e os elementos verticais, sendo que esta ligação em estruturas metálicas é geralmente feita através de chumbadouros.

Sendo ao nível da base onde os esforços são maiores, os chumbadouros tendem a sofrer deformações, em alguns casos excessivas, podendo levar ao colapso da estrutura, ou deixando deformações impossíveis de recuperar. A introdução de elementos SMAs permite, mais uma vez não só controlar as vibrações através da dissipação de energia ocorrida nos ciclos, como também recuperar a forma original caso tenha sido atingido o regime plástico aproveitando o efeito da memória de forma (Tamai, Kitagawa, 2002).

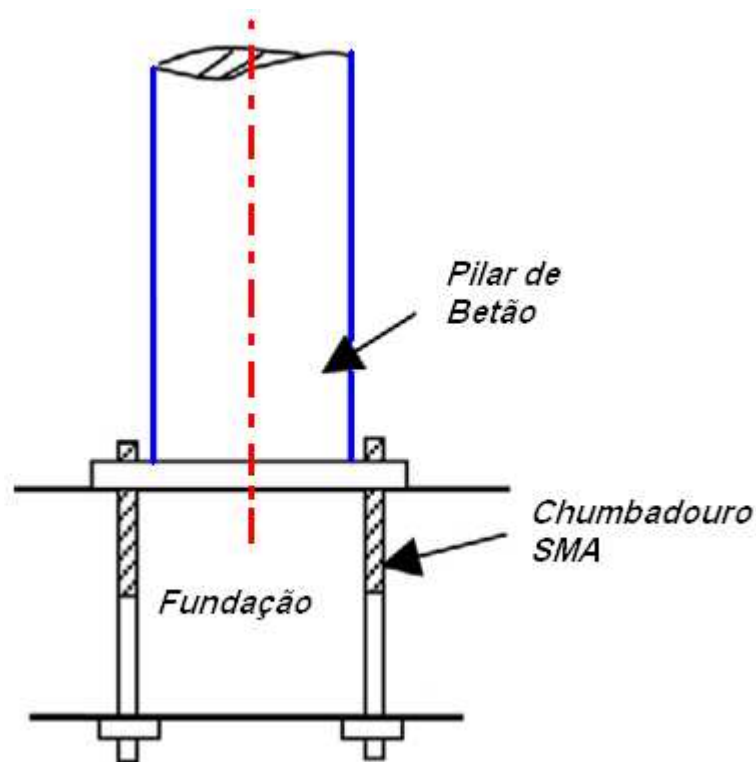


Figura 1.14 – Recurso a chumbadouros com elementos SMAs



## II. SIMULAÇÃO MATLAB



## ***1. Simulação Matlab***

Uma vez conhecidas as propriedades dos SMAs, foi iniciada a análise do seu comportamento. Para tal recorreu-se ao programa Matlab, onde o Eng. Filipe Santos (Santos & Cismasiu, 2009) disponibilizou uma programação onde é possível testar os modelos constitutivos de Tanaka e Auricchio para o comportamento dos materiais SMA.

## 2. Modelo de Auricchio

O modelo de Auricchio (Auricchio, et al., 1997) é um dos dois modelos constitutivos estudados nesta dissertação. Este modelo visa o estudo do comportamento superelástico das ligas com memória de forma tendo em conta as diferentes propriedades elásticas das fases austenítica e martensítica.

O modelo caracteriza-se por ser relativamente simples e com resultados bastante próximos dos resultados experimentais (Dolce & Cardone, 2001), no entanto será necessário ter em consideração alguns factores que serão abordados de seguida.

Este modelo relaciona nas suas leis constitutivas a **tensão**, a **deformação** e a **fracção de fase martensítica**.

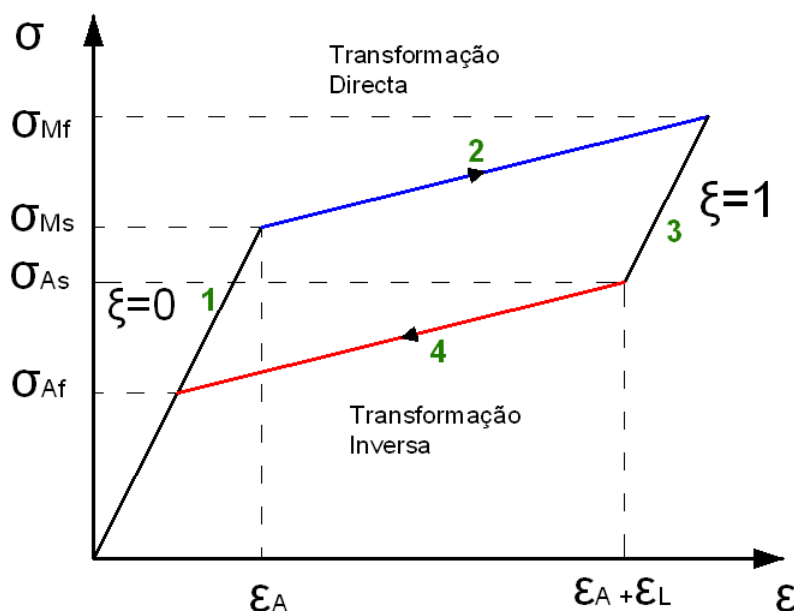


Figura 2.1 – Percentagem Martensítica dos SMAs

De configuração fácil, este modelo constitutivo baseia-se nas tensões críticas (tensões de mudança de fase), no módulo de elasticidade austenítico e no coeficiente de percentagem martensítica.

No trajecto 1 do gráfico da Figura 2.1, em que o material se encontra em pleno estado austenítico, o coeficiente de percentagem martensítico é igual a zero, pelo que o material irá se comportar de acordo com o módulo de elasticidade austenítico. A partir do momento em que o material passa da fase austenítica para uma fase de transição, correspondente ao caminho 2 da Figura 2.1, o coeficiente de percentagem martensítico afectará o comportamento do material, crescendo até um limite máximo de uma unidade, momento este em que atinge a fase martensítica. Desta forma, o módulo elástico é uma variável da fracção martensítica.

De forma a simplificar as equações é aplicada a lei dos pequenos deslocamentos para a obtenção da deformação a partir da tensão, que culmina numa relação linear de tensão/deformação.

Devido à grande variação de módulos de elasticidade entre a fase austenítica e a fase martensítica, admite-se que os SMAs são materiais compostos onde para o cálculo do módulo de elasticidade martensítico se considera que a fracção martensítica  $\xi$  é igual a 1.

Para a elaboração deste modelo Auricchio considerou que o material apresenta um comportamento isotrópico, simplificando desta maneira o comportamento do mesmo. Auricchio assumiu também que não existe variação na transformação de fase, isto é, o comportamento do material na transformação directa é igual ao da transformação inversa.

A grande limitação deste modelo constitutivo é a ausência do factor temperatura na modelação, fazendo com que apenas possa ser utilizado eficientemente em análises estáticas ou com frequências muito próximas de um comportamento estático (Santos & Cismasiu, 2008).

Como foi explicado no primeiro capítulo, os SMAs alternam de fase mediante a aplicação de uma tensão suficientemente grande para tal ou através da indução de uma variação de temperatura, sendo que o comportamento do material será de acordo com o apresentado da Figura 1.3.

Ao ser aplicada uma tensão, consoante a transformação (directa ou inversa), irá existir uma troca de calor entre o material e o meio envolvente, sendo libertado ou absorvido calor por parte do material. Se a aplicação da carga for feita de um forma que possa ser considerada estática ou muito próximo de tal, o que se verifica é que o material tem capacidade de efectuar uma troca de calor com o meio envolvente, dissipando assim essa energia. Ao ser considerada esta hipótese admite-se que a energia térmica criada durante a solicitação do material não influencia o comportamento do mesmo, podendo assim não ser levada em conta numa modelação.

No entanto, ao analisar o comportamento do material em regime dinâmico, o que se verifica é que as reacções de troca de energia térmica com o meio envolvente deixam de ser tão eficientes, levando a que a dissipação de energia seja menor, reduzindo a eficiência de amortecimento do material (Dolce & Cardone, 2001).

Ao não ter em consideração este factor, o modelo de Auricchio tem a desvantagem de em regime dinâmico dar origem a valores de dissipação de energia superiores aos reais (Dolce & Cardone, 2001), situação esta que poderá dar origem a um sub dimensionamento de uma hipotética estrutura. No entanto, um dos objectivos desta dissertação será mostrar que este método é aplicável tomando em conta alguns factores que o fazem aproximar da realidade, factores estes que serão abordados neste capítulo da dissertação.

A descrição pormenorizada deste modelo constitutivo pode ser consultada em (Auricchio et al., 1997).

Na Figura 2.1 (Dolce & Cardone, 2001) é possível observar os resultados obtidos para um ensaio estático experimental de uma liga Ni-Ti e os valores obtidos por modelação numérica recorrendo ao modelo de Auricchio (Dolce & Cardone, 2001). Verifica-se que a aproximação é bem conseguida para um regime estático.

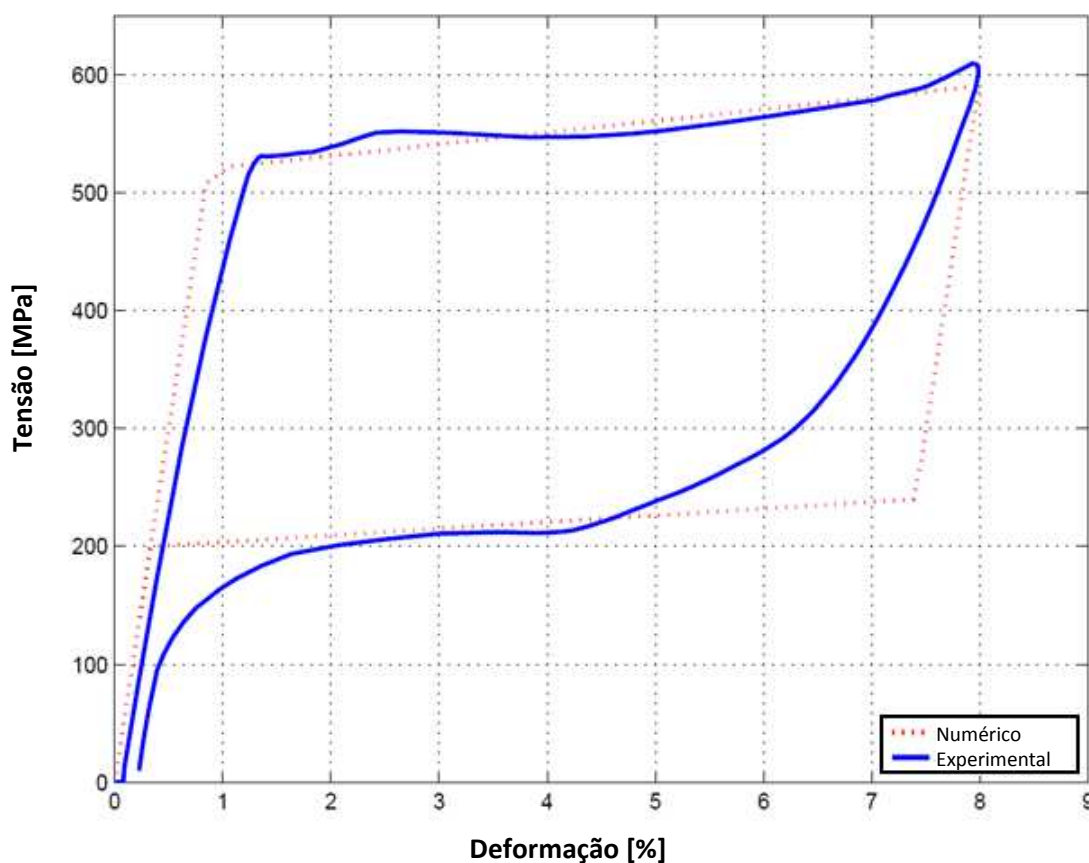


Figura 2.2 – Comparação Método numérico/Experimental: Tensão/Deformação (Auricchio et al., 1997)

Como constantes o modelo de Auricchio apresenta:

$E_A$  = Módulo Austenítico

$e_L$  = deformação elástica

$\sigma_{M_s}$  = Tensão inicial fase martensítica

$\sigma_{M_f}$  = Tensão final fase martensítica

$\sigma_{A_s}$  = Tensão inicial fase austenítica

$\sigma_{A_f}$  = Tensão final fase austenítica



### 3. Modelo de Tanaka

O modelo matemático de Tanaka (Tanaka et al., 1986) que modela o comportamento do material Ni-Ti é mais complexo que o modelo de Auricchio. Neste caso, para além de relacionar a tensão, a deformação e o coeficiente de percentagem martensítica (à semelhança do modelo de Auricchio), o modelo de Tanaka relaciona também a temperatura do material.

À semelhança do modelo de Auricchio, o modelo de Tanaka recorre também à fracção martensítica para a obtenção dos módulos de elasticidade nas duas fases de transformação dos SMAs, sendo novamente o módulo de elasticidade martensítico calculado com recurso à fracção martensítica  $\xi$  e o módulo de elasticidade austenítico com recurso a  $1 - \xi$ . No entanto, enquanto no modelo de Auricchio o módulo de elasticidade é calculado directamente através das tensões e da fracção martensítica, neste caso a fracção martensítica é expressa em função dos valores instantâneos de tensão e temperatura influenciando desta forma os resultados. Desta forma, o comportamento dos SMAs irá ser afectado pelas diferentes temperaturas ambiente.

Outro factor que torna este modelo mais realista com a introdução do factor temperatura é a variação desta ao longo dos carregamentos que provocam mudanças de fase. Sabendo-se que diferentes temperaturas correspondem a diferentes comportamentos, ao ser comparado com o modelo de Auricchio que era apenas gerido pelas tensões/deformações/fracção martensítica conclui-se que o modelo de Tanaka exprime resultados mais próximos dos ensaios reais (Paiva & Savi, 1999).

Como constantes o modelo de Tanaka apresenta:

$E_A$  = Módulo Austenítico  
 $e_L$  = deformação elástica  
 $E_M$  = Módulo Martensítico  
 $\theta$  = coeficiente de expansão térmica  
 $C_M$  = calor específico martensítico  
 $C_A$  = calor específico austenítico  
 $M_s$  = Temperatura inicial fase martensítica  
 $M_f$  = Temperatura final fase martensítica  
 $A_s$  = Temperatura inicial fase austenítica  
 $A_f$  = Temperatura final fase austenítica  
 $T$  = Temperatura ambiente

A descrição pormenorizada deste modelo constitutivo pode ser consultada em (Tanaka et al., 1986).

## 4. Comparação entre Modelo de Auricchio e Modelo de Tanaka

### 4.1. Modelo adoptado

Com o objectivo de provar a aplicabilidade do modelo de Auricchio, bastante mais simples para uma posterior aplicação no **capítulo III** desta dissertação, recorreu-se a uma série de simulações numéricas do comportamento de um dissipador baseado em ligas com memória de forma utilizando um programa em Matlab, disponibilizado pelo Eng. Filipe Santos (Santos & Cismasiu, 2008). O programa permite ao utilizador escolher entre os modelos constitutivos acima mencionados e avaliar o comportamento do modelo quando sujeito a vibrações.

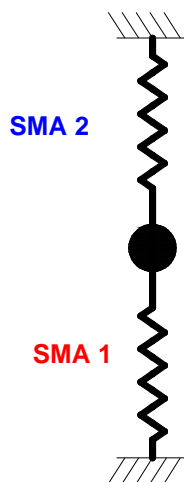


Figura 2.3 – Modelos utilizados na modelação MathLab

Com base em dispositivos de dissipação sugeridos por Dolce (Dolce & Cardone, 2001), o dispositivo a ser analisado é composto por duas molas (Figura 2.3 à esquerda), simulando os elementos Ni-Ti, e uma massa. Este modelo é em tudo semelhante aos modelos académicos, sendo imposta uma excitação no sistema que fará com que a massa oscile em torno do seu ponto de equilíbrio. Como principais variáveis tem-se a força de restituição elástica e o deslocamento proveniente da excitação imposta.

## 4.2.Características do modelo

A programação elaborada por o Eng. Filipe Santos (Santos & Cismasiu, 2008) permite configurar as características do material SMAs e as condições de ensaio, sendo possível desta forma simular o comportamento do material em diferentes temperaturas, frequências de excitação ou amplitudes de força.

As características do modelo utilizado são as seguintes:

Tabela 2.1 - Propriedades do modelo

$\gamma = \frac{1}{2}$ (método da aceleração média)
$\beta = \frac{1}{4}$ (método da aceleração média)
massa do oscilador = 5 .00 kg
Comprimento do cabo = 1.00 m
Diâmetro do cabo = $2.4 \times 10^{-3}$ mm
Numero de cabos = 1
Temperatura ambiente = 22 °C
$E_A = 28.5$ GPa (Módulo Austenítico)
$e_L = 0.058$ (deformação elástica)

Tabela 2.2 - Propriedades específicas do modelo de Auricchio

$\sigma_{M_s} = 360$ MPa (Tensão inicial fase martensítica)
$\sigma_{M_f} = 410$ MPa (Tensão final fase martensítica)
$\sigma_{A_s} = 135$ MPa (Tensão inicial fase austenítica)
$\sigma_{A_f} = 85$ MPa (Tensão final fase austenítica)

Tabela 2.3 - Propriedades específicas do modelo de Tanaka

$E_M = 13.5 \text{ GPa}$ (Módulo Martensítico)
$\theta = -1600 \text{ K}^{-1}$ (coeficiente de expansão térmica)
$C_M = 5.0e3 \text{ Pa/K}$ (calor específico martensítico)
$C_A = 5.0e3 \text{ Pa/K}$ (calor específico austenítico)
$M_s = -60 \text{ MPa}$ (Temperatura inicial fase martensítica)
$M_f = -50 \text{ MPa}$ (Temperatura final fase martensítica)
$A_s = -5 \text{ MPa}$ (Temperatura inicial fase austenítica)
$A_f = 5 \text{ MPa}$ (Temperatura final fase austenítica)
$T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ (Temperatura ambiente)

Devido à boa aproximação do modelo de Tanaka ao real comportamento do material (Tanaka et al., 1986), este servirá como referência para a comparação entre o modelo de Auricchio e o comportamento real, uma vez que os ensaios disponíveis na bibliografia limitam a fonte de dados.

Serão apresentados vários testes que nos permitem avaliar a aplicabilidade ou não dos modelos em questão.

Uma vez que a utilização do modelo de Auricchio pode levar a resultados menos correctos devido a não considerar no seu modelo constitutivo as equações cinéticas ligadas à temperatura de mudança de fase do material, será necessário ajustar os valores das tensões de mudança de fase de forma a que os resultados sejam comparáveis. Como tal, para cada ensaio realizado recorrendo ao programa Matlab, foi inicialmente corrida a modelação de Tanaka a partir da qual foram retirados os valores necessários para a calibração do modelo de Auricchio. Os valores de Tanaka foram retirados da bibliografia (Dolce & Cardone, 2001).

A acção aplicada nas análises é da forma  $p(t) = P \times \sin(2 \pi \cdot \omega \cdot t)$  sendo “P” a amplitude da força, “ $\omega$ ” a frequência da excitação e “t” a duração da acção.

Foi também introduzido um pré-esforço que garantirá que os elementos SMA estejam sempre sujeitos à tensão e nunca à tracção.

### 4.3.Recentramento do modelo

Na Figura 2.4, onde se encontra à direita o modelo inicial e à esquerda o modelo final, pode-se observar que o segundo possui uma terceira mola (SMA 3). A introdução desta mola permitirá ao sistema regressar à posição de equilíbrio inicial após a solicitação de uma carga ou de uma excitação, como será explicado de seguida.

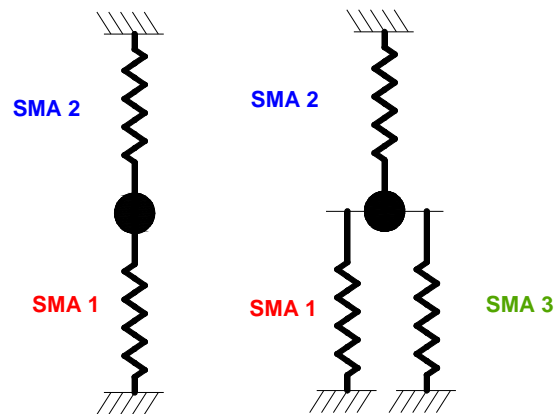


Figura 2.4 – Modelo otimizado

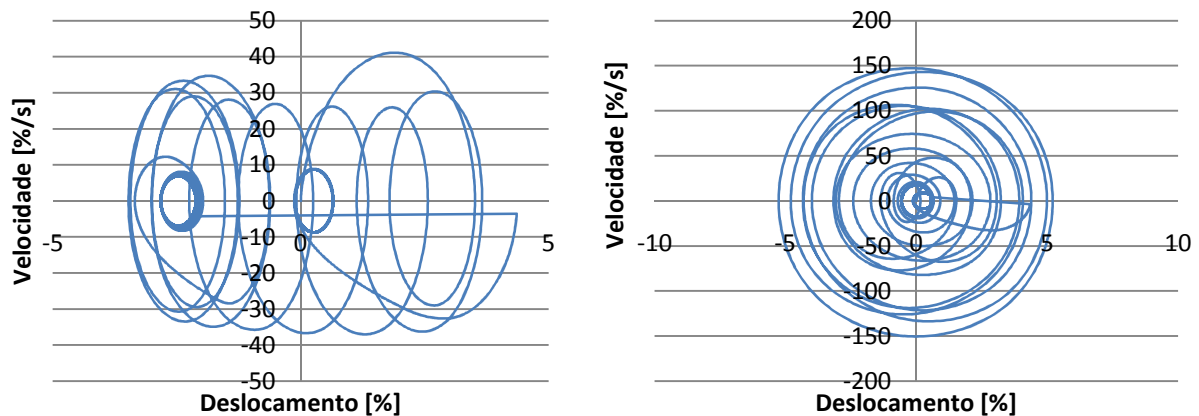


Figura 2.5 – Gráficos Velocidade/ Deslocamento

Para iguais condições de ensaio vê-se à esquerda o modelo sem a 3ª mola e à direita o modelo com a 3ª mola SMA. Como é possível visualizar na Figura 2.5, constata-se que no primeiro exemplo a posição inicial de equilíbrio é perdida, sendo que o modelo que começa com uma posição inicial em (0,0), acabando por a perder encontrando um novo equilíbrio em (-0.5; 0). Na imagem da direita, é possível observar que o sistema oscila consistentemente em torno da origem (0,0), sendo que ao cessar a excitação, o sistema encontra novamente o seu equilíbrio na posição de origem.

A origem deste problema são as várias alternâncias de fase (martensítica/austenítica) que ocorrem ao longo dos ciclos, e sendo que os dois SMAs, em regra geral, não se encontram na mesma fase de transformação, sucede que as forças de restituição das molas não têm o mesmo valor, fazendo com que o sistema não esteja em equilíbrio quando o movimento deste termina.

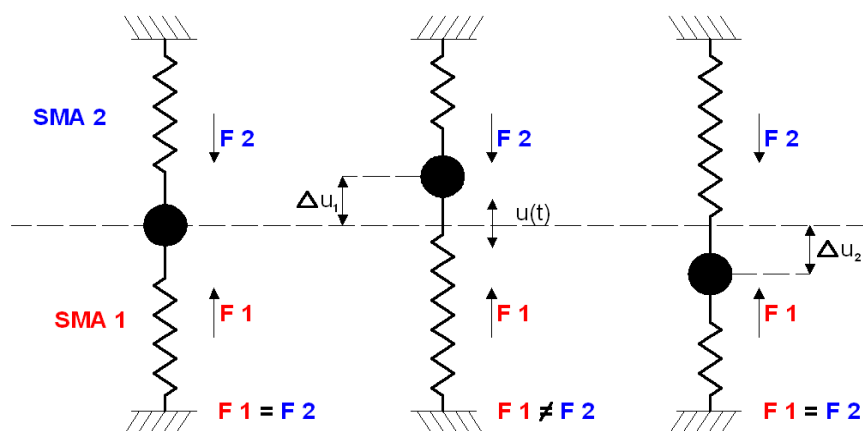


Figura 2.6 – Modelo SMA – Posição de equilíbrio

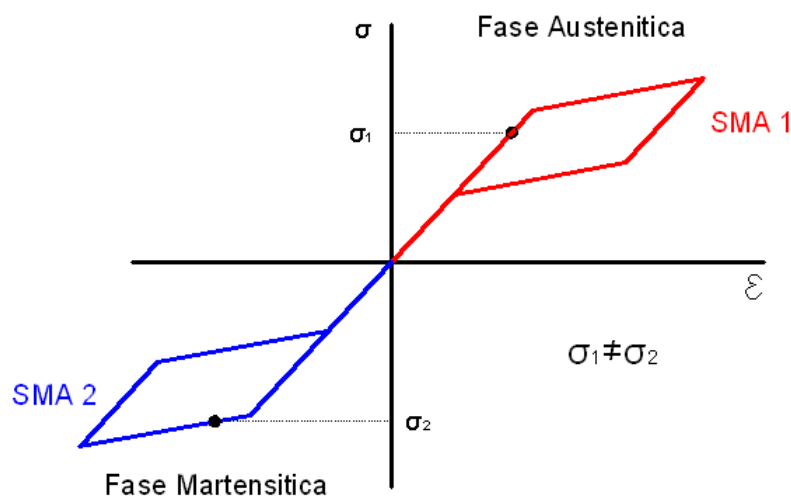


Figura 2.7 – Tensões e deformações de equilíbrio

Como é possível observar no modelo da Figura 2.6 em cima apresentada, vê-se que o sistema ao deslocar-se verticalmente leva a que uma mola fique à compressão e outra à tracção.

No gráfico da Figura 2.7, onde a azul se encontra o SMA 1 e a vermelho o SMA 2, é possível observar que para um determinado instante, os valores da força de restituição não são os mesmos para os dois SMAs.

Ao terminar a aceleração, o ponto de equilíbrio devido à desigualdade das forças é alterado, perdendo o sistema a sua posição de equilíbrio inicial. Tem-se então que para  $\Delta u = 0$   $F_1 \neq F_2$ , o que leva a que o sistema procure um novo ponto de equilíbrio estático.

Para corrigir este problema recorreu-se a um 3º elemento SMA. Este elemento tem um comportamento completamente elástico, não dissipando energia, pelo que não irá interferir nos resultados, mas contribuindo no entanto para a restituição à posição inicial do sistema, permitindo que no final o equilíbrio em torno da origem seja restituído.  $F_1 = F_2 + F_3 \Rightarrow \Delta u = 0$

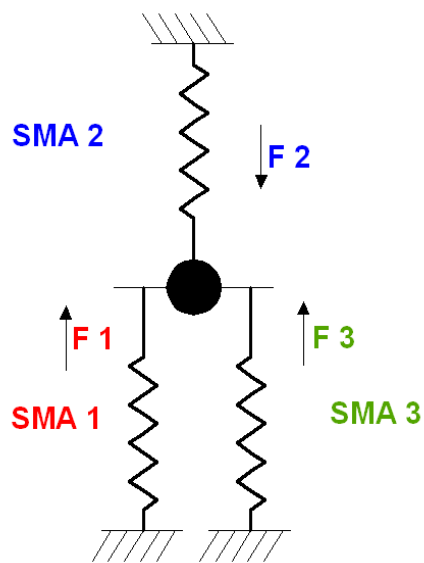


Figura 2.8 –Modelo final

## 4.4. Calibração do modelo

Como foi descrito anteriormente, devido à boa aproximação do modelo de Tanaka com os valores experimentais (Tanaka et al., 1986) foi considerado como ponto de partida o modelo de Tanaka de forma a que se pudesse efectuar uma comparação e avaliar a aplicabilidade do modelo de Auricchio.

Para cada um dos testes efectuados foi inicialmente corrido o modelo de Tanaka. Após análise dos dados foi construído um gráfico Tensão/ Deformação.

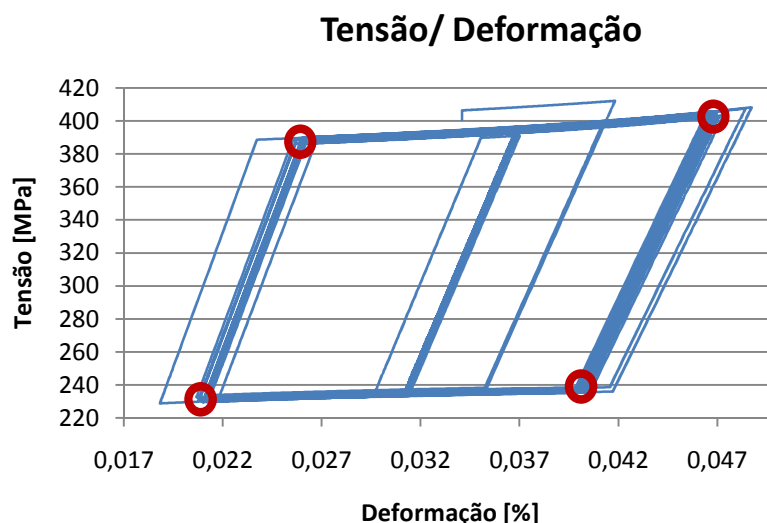


Figura 2.9 –Calibração modelo Auricchio – Tensão/Deformação

A partir deste gráfico, com os resultados do modelo de Tanaka, é possível retirar a informação necessária para calibrar o modelo de Auricchio.

São retirados os pontos críticos das transformações de fase Austenítica e Martensítica e também o módulo de elasticidade da fase Austenítica. Os pontos de transformação correspondem aos pontos de inflexão do gráfico, enquanto o módulo de elasticidade é retirado do declive da fase Austenítica, sendo para tal utilizados dois pontos.

Sendo que é para as baixas frequências que se verifica uma maior dissipação de energia (Dolce & Cardone, 2001), ao calibrar o modelo para frequências mais elevadas (entre 1 e 4 Hz) em que se obtém uma dissipação inferior, garante-se que na utilização do material num ensaio a baixas frequências a dissipação seja sempre inferior à real, estando como tal do lado da segurança.



Neste exemplo, que corresponde ao ensaio efectuado com 2Hz, foram retirados os valores da zona mais concentrada do gráfico, que corresponde ao sistema já estabilizado.

$$\sigma_{M_s} = 385.59 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{M_f} = 405.43 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{A_s} = 235.71 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{A_f} = 230.09 \text{ MPa}$$

Utilizando dois pontos da fase austenítica do gráfico, correspondente ao percurso indicado no gráfico como “1” na Figura 2.9, obtém-se os valores necessários para o cálculo do modo de elasticidade da fase Austenítica.

Uma não calibração do modelo de Auricchio em função da frequência pode levar a valores que não correspondem à realidade. Na Figura 2.10 valores das tensões de mudança de fases foram calibrados para serem utilizados em função de uma frequência de 0.01Hz. No entanto, para um ensaio a uma frequência de 2Hz, os mesmos valores deram origem a uma discrepância com o modelo de Tanaka, onde o modelo de Auricchio apresentou valores de dissipação de energia (correspondentes à área do gráfico da Figura 2.9) maiores que o modelo de Tanaka (representativo de casos reais).

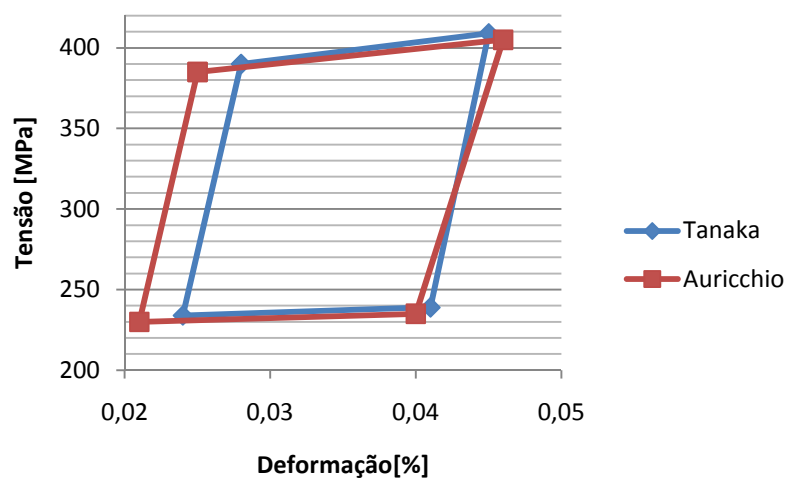


Figura 2.10 –Comparação modelo calibrado com modelo não calibrado

## 4.5. Testes

Foram executados 6 testes com diferentes frequências: 0.001, 0.01 Hz, 0.1Hz, 1Hz, 2Hz e por fim 4Hz.

Os resultados destes testes encontram-se no **Anexo III**.

Tendo uma gama de frequências suficientemente abrangente foram sobrepostos os gráficos Força/deslocamento que nos permitem avaliar a dissipação de energia mediante as várias frequências analisadas.

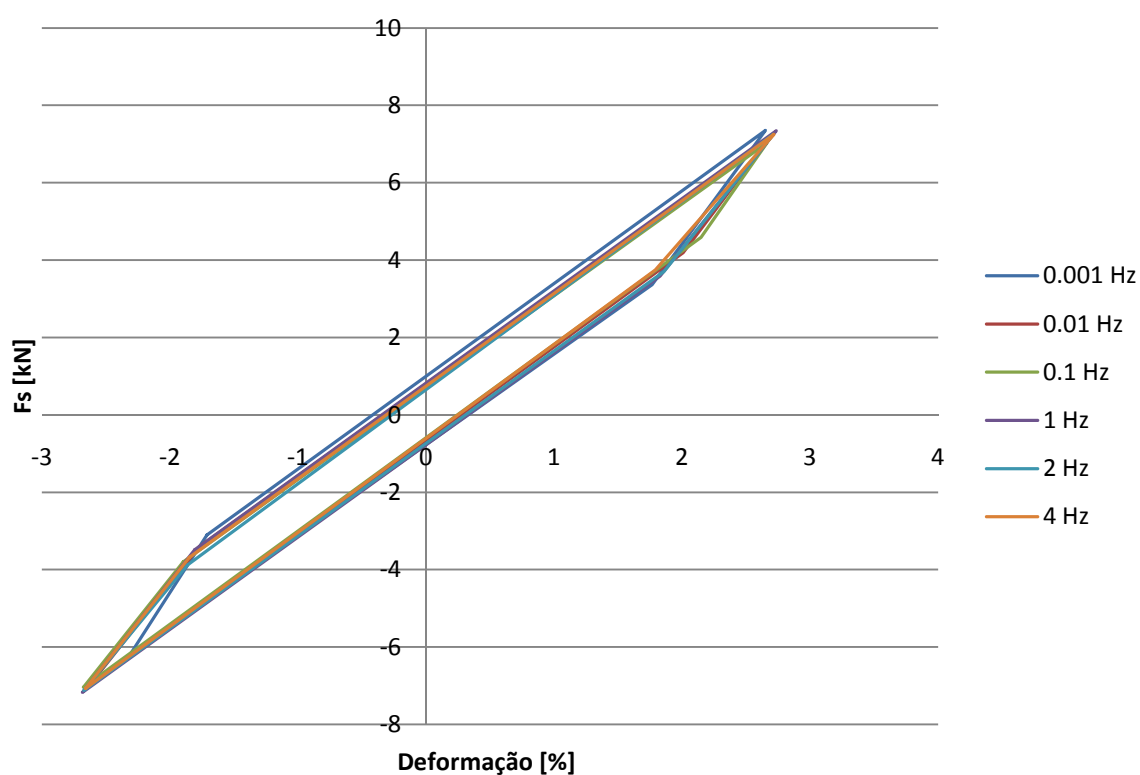


Figura 2.11 –Força/Deslocamento – Sobreposição de frequências

Como é possível observar na sobreposição dos gráficos, existe uma grande semelhança nos resultados obtidos para as várias frequências, sendo que apenas na frequência mais baixa (0.001Hz) se verifica uma ligeira diferença.

#### 4.6. Coeficiente de amortecimento viscoso equivalente

O amortecimento viscoso linear provém de um simples modelo matemático, onde a força é directamente proporcional à velocidade da partícula no fluido. No entanto, se o amortecimento do sistema é mais complexo que o amortecimento viscoso linear, que é o caso dos SMAs, é possível recorrer à simplicidade do modelo viscoso introduzindo-se a ideia de um amortecimento viscoso equivalente (Chopra, 2001).

Sendo que os SMAs possuem um amortecimento não viscoso, recorrendo ao amortecimento viscoso equivalente será possível equiparar e comparar o amortecimento estrutural do SMA com outros sistemas de dissipação existentes.

Para o cálculo do coeficiente será necessário conhecer experimentalmente a dissipação obtida durante um ciclo mediante uma oscilação harmónica do sistema, sendo traduzida pela fórmula 1) em baixo apresentada.

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \times \frac{E_D}{E_{S0}} \quad 1)$$

Em que  $E_D$  corresponde à área do gráfico tensão/deformação, e  $E_{S0}$  corresponde à área entre o ponto e deslocamento máximo e a origem.

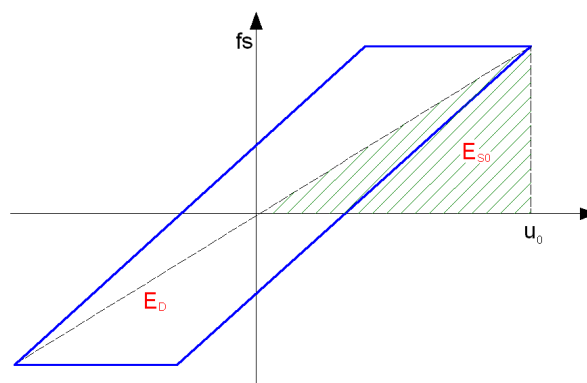


Figura 2.12 –Coeficiente de amortecimento viscoso equivalente

Foi de seguida calculado o coeficiente de amortecimento viscoso equivalente para os testes realizados.

Tabela 2.4 - Coeficiente de amortecimento viscoso equivalente

Freq. [Hz]	$E_D$	$E_{S0}$	$\zeta_{eq}$
0.001	4,430	2,52	0,13996
0.01	4,370	2,576	0,13507
0.1	4,365	2,567	0,13538
1	4,367	2,632	0,13210
2	4,373	2,614	0,13319
4	4,384	2,621	0,13317

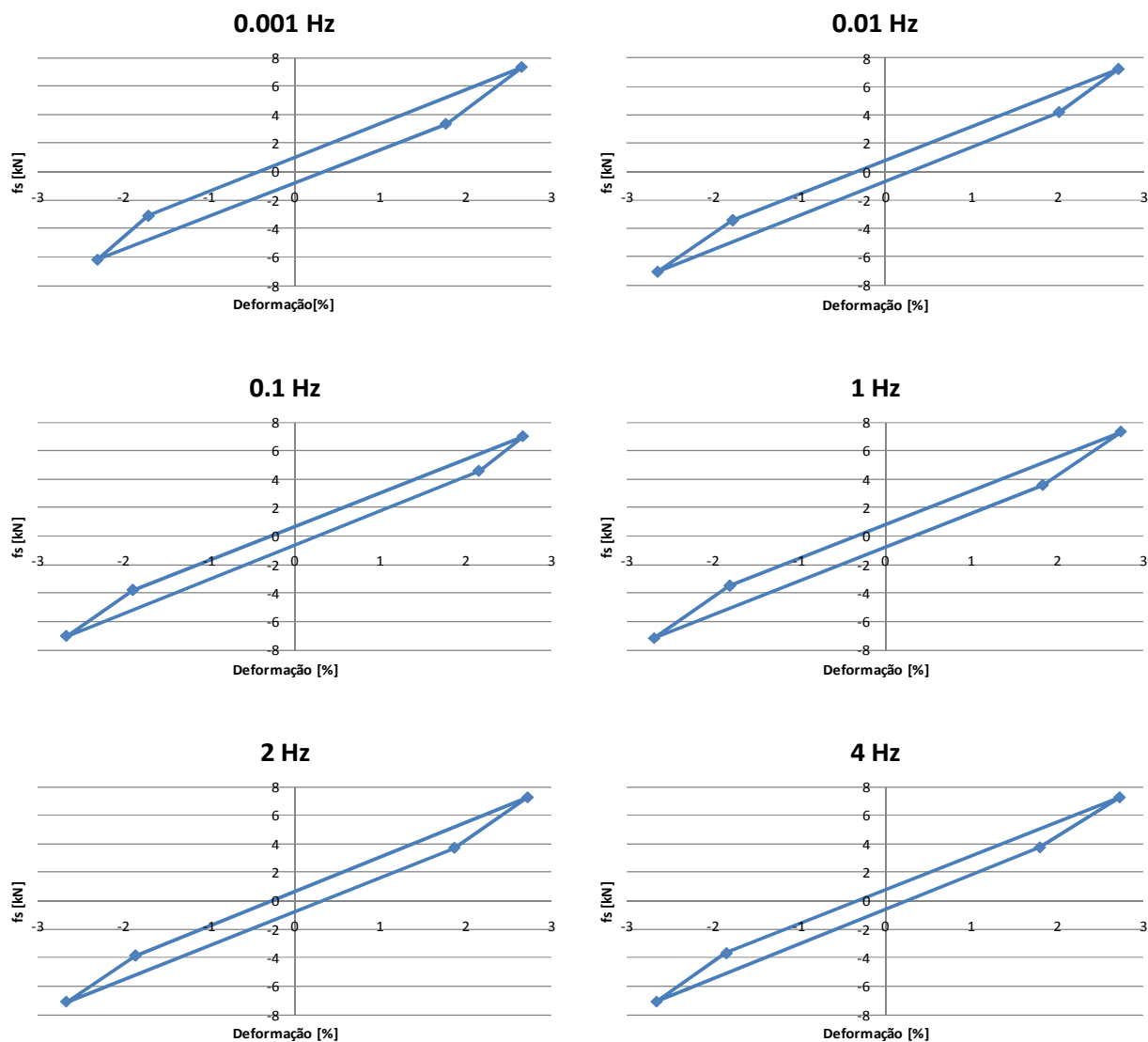


Figura 2.13 –Força/ Deslocamento – Frequências

Após calculados os valores dos coeficientes de amortecimento viscoso equivalente foi traçado um gráfico que nos permite avaliar o amortecimento em função da frequência.

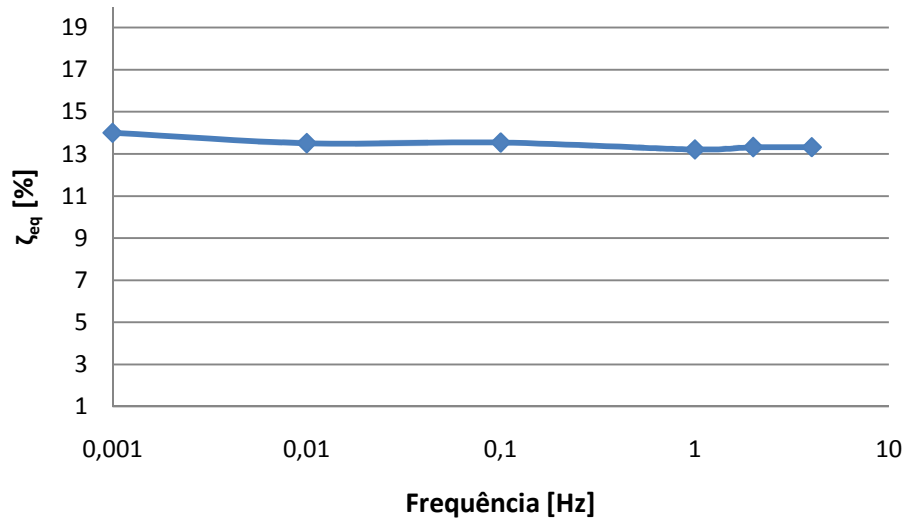


Figura 2.14 –Coeficiente de amortecimento viscoso equivalente/Frequência

Ao observar o gráfico pode-se concluir que o amortecimento se manteve praticamente constante ao longo de todos os testes, tendo no entanto um ligeiro pico na frequência 0.001Hz.

Para os testes obteve-se um coeficiente viscoso equivalente com um valor médio de 13.5%.

Sendo que a dissipação é constante ao longo desta gama de frequências pode-se concluir que ao calibrar o modelo de Auricchio para um modelo uma frequência máxima, que neste caso foi de 4Hz, está-se a garantir que a dissipação para outras frequência se irá situar em torno do mesmo valor, evitando sobre-estimação da capacidade dissipadora do sistema.



### **III. SIMULAÇÃO ANSYS**





## ***1. Introdução a simulação Ansys***

Como foi descrito nos capítulos anteriores desta dissertação, foram demonstradas e provadas as condições necessárias referentes às frequências de excitação e capacidades dissipadoras e de amortecimento para a utilização do modelo de Auricchio para a modelação de materiais com memória de forma.

A escolha deste programa de cálculo deu-se ao facto deste possuir na sua biblioteca de materiais o modelo constitutivo do material SMA, modelo este que segue o princípio do modelo de Auricchio. Entre outras funcionalidades o programa permite efectuar análise dinâmicas de estruturas com comportamento não linear. Outra das razões foi o facto de o Departamento de Engenharia Civil (DEC) possuir uma licença do programa.

Como foi demonstrado anteriormente, o modelo de Auricchio, embora menos completo que o modelo de Tanaka, pode levar a resultados muito próximos da realidade se for tida em conta a frequência de excitação. Outro factor a ter em conta é a calibração das tensões características de mudança de fase do material.

Estando nas condições da aplicabilidade do modelo de Auricchio, adoptou-se um modelo simplista onde será possível avaliar o comportamento de uma estrutura onde é feito o recurso a tirantes com elementos SMA.

Esta simulação tem como objectivo provar a eficiência da aplicação de materiais SMA para o controlo de vibrações em estruturas através de dissipação de energia.

## 2. Modelo

O modelo estrutural escolhido para o estudo foi um modelo simplista, frequentemente utilizado em problemas académicos para a avaliação de deslocamentos.

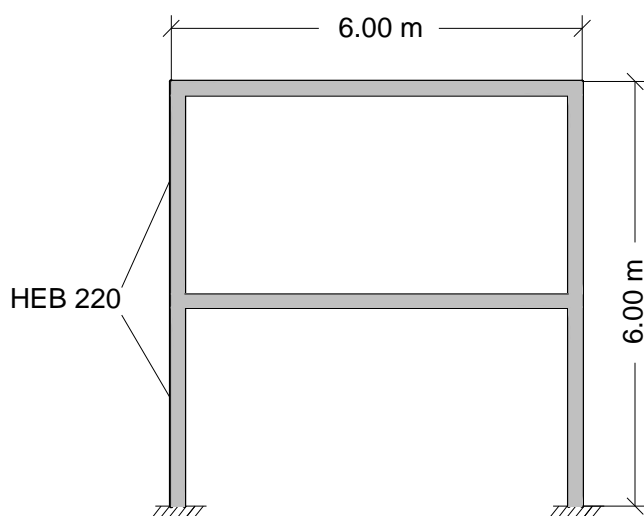


Figura 3.1 –Modelo Ansys

O modelo é constituído por uma estrutura em pórtico de dois pisos. Ao longo dos testes que foram executados no programa foram sendo adoptadas alterações como a introdução de tirantes. O pórtico é constituído por dois pisos de 3m cada com uma largura de 6m.

Será inicialmente abordada uma estrutura porticada sem tirantes. De seguida serão adicionados tirantes de um material igual ao da estrutura (aço), que permitirão obter uma redução dos deslocamentos máximos. Por ultimo os tirantes de aço serão substituídos por tirantes SMA. Este ultimo modelo permitirá obter um controlo de vibrações eficaz através de dissipação de energia.

A estrutura adoptada é uma estrutura metálica, composta por perfis HEB 220 tanto ao nível dos pilares como das vigas.

Como condições de apoio, foi considerado que ambos os pilares estavam encastrados, de forma a ir de encontro a uma situação real em que os pilares se encontrassem chumbados numa sapata, restringindo todos os deslocamentos e libertações de rotações nesses pontos.

### ***3. Metodologia de simulação***

A metodologia adoptada para a análise das 3 estruturas foi de acordo com as limitações do programa Ansys.

Se por um lado, para materiais com comportamento linear o programa permite explorar praticamente todo o tipo de análises, para materiais não lineares a escolha é mais restrita.

De entre a análise estática, modal, harmónica, transiente e espectral, para materiais não lineares apenas é possível executar análises estáticas ou transientes, deixando de fora as análises modais e espectrais que seriam interessantes de forma a comparar a influência da introdução de SMA na frequência própria da estrutura, da rigidez desta ou nos deslocamentos afectos aos modos.

Desta forma os testes executados resumiram-se a análise transientes das 3 estruturas em cima mencionadas.

Uma informação mais detalhada do processo de modelação e configuração dos modelos pode ser consultada no **Anexo III** desta dissertação.

### Análise Transiente:

A análise transiente é uma análise dinâmica do tipo *time-history*, isto é, permite obter resultados em função do tempo. Para estas análises recorreu-se a um acelerograma, que permitirá aplicar uma excitação de base às estruturas analisadas. A excitação será aplicada como forma de deslocamentos de base uma vez que o programa não permite a introdução directa de acelerações.

Como acelerograma, a escolha recaiu sobre o sismo de Northridge ocorrido em 17 de Janeiro de 1994 no estado de Califórnia nos Estados Unidos da América (PEER, 2009).

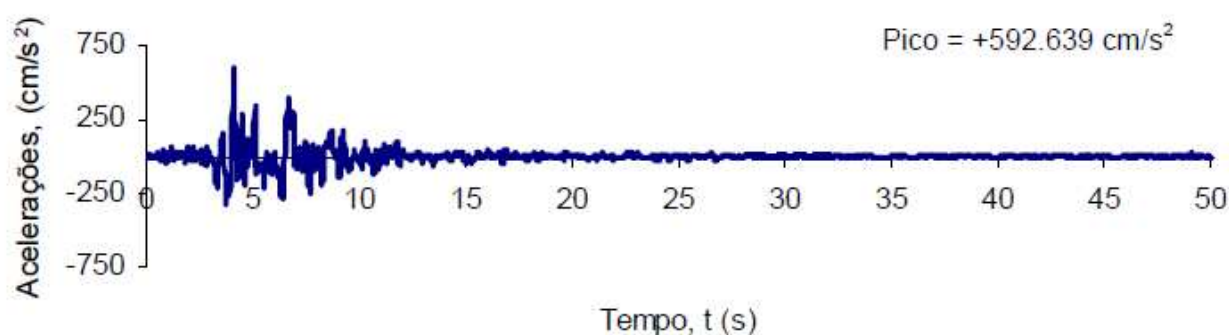


Figura 3.2 – Sismo de Northridge – Acelerograma

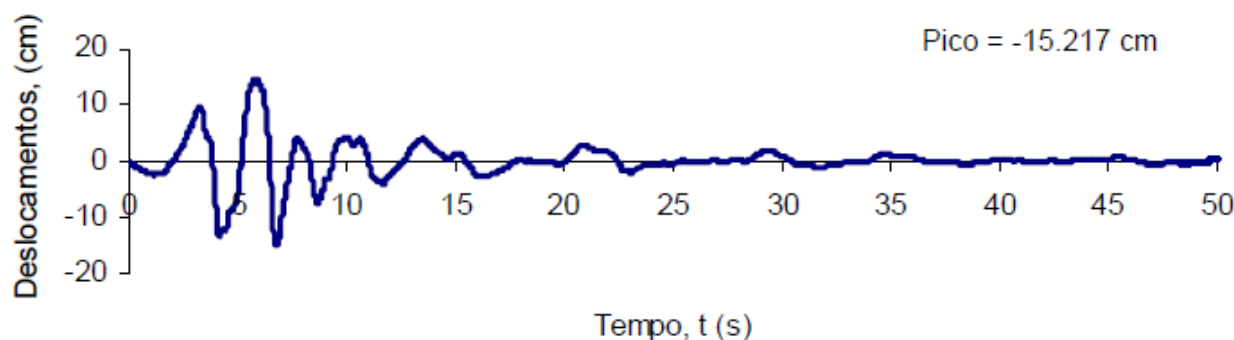


Figura 3.3 – Sismo de Northridge – Sismograma - deslocamento/tempo

## 4. Simulação

### ENSAIO 1 – PORTICO DE DOIS ANDARES

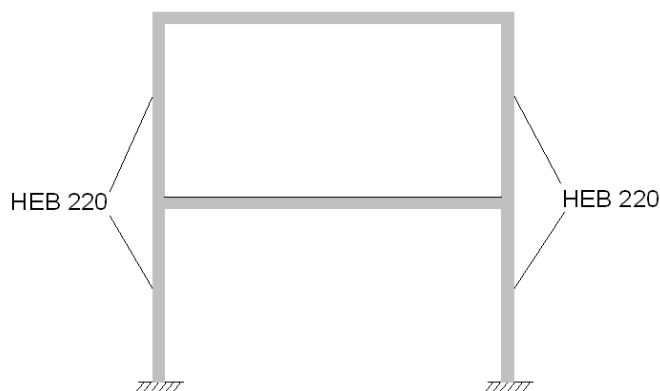


Figura 3.4 –Modelo Ansys – Pórtico 2 andares sem tirantes

Neste primeiro ensaio foi considerado um pórtico de dois andares constituído apenas por vigas e pilares HEB 220.

Como descrito anteriormente os pilares inferiores encontram-se com todos os deslocamentos restringidos.

De forma a simular uma laje, a inércia das vigas foi considerada exageradamente alta, dando origem a que a sua rigidez seja também ela elevada, garantindo assim ao sistema uma deformação menor ao nível da laje do edifício.

Para este ensaio, à semelhança dos seguintes foi considerado um coeficiente de amortecimento  $\beta$  de 5%, de forma a simular o amortecimento deste tipo de estrutura.

Como acção exterior foi considerado um deslocamento ao nível dos apoios de acordo com o espectro da Figura 3.3. Para aplicação do mesmo foi criada uma tabela com os valores dos deslocamentos em função do tempo.

Após corrida a análise transientes verificou-se que a estrutura teve um deslocamento máximo na ordem de 13cm, ocorridos ao segundo 7.

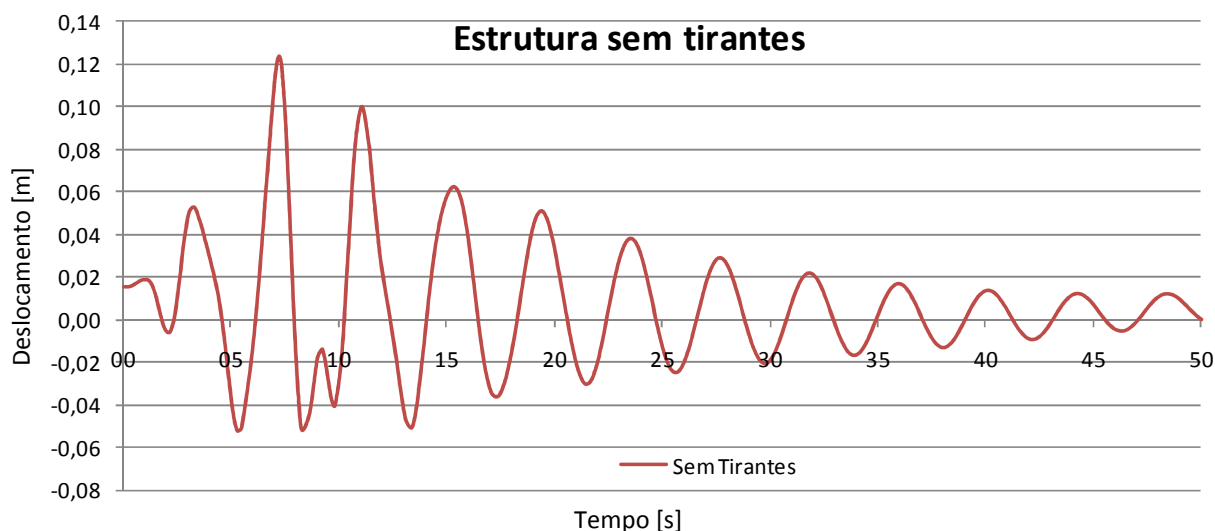


Figura 3.5 –Time-History – Estrutura sem tirantes

Como conclusão final pode-se concluir que a estrutura apresentou um amortecimento pouco eficaz prolongando-se a oscilação praticamente durante toda a análise de 50 segundos.

Para corrigir a resposta da estrutura teria de ser adoptado um mecanismo de dissipação de energia ou aumentar a inércia desta com a alteração dos elementos verticais das mesma.

A adopção de um perfil com maior inércia reduziria certamente os deslocamentos, mas como contrapartida iria aumentar consideravelmente a rigidez da estrutura, o que levaria a um aumento das frequências próprias da mesma, sendo que tal não seria recomendado.

## ENSAIO 2 – PORTICO DE DOIS ANDARES COM TIRANTES

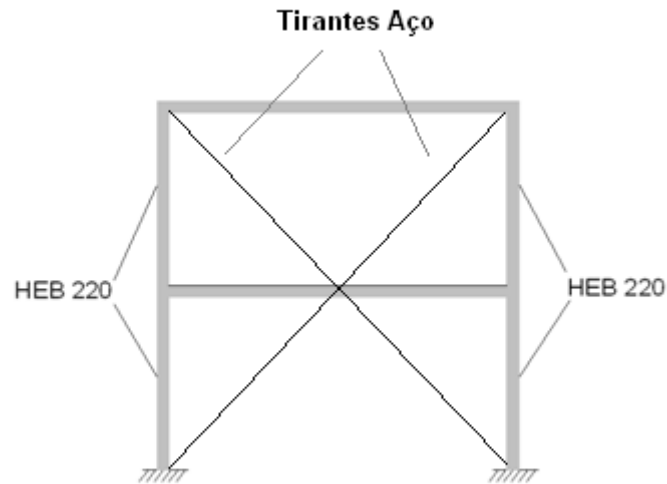


Figura 3.6 –Modelo Ansys – Pórtico 2 andares com tirantes de aço

Neste segundo ensaio foi considerado o mesmo pórtico de dois andares do ensaio 1, mas com a adopção de tirantes transversais que unem obliquamente as extremidades da estrutura.

Os tirantes têm um diâmetro de 15mm e as características do material são em tudo idênticas ao dos perfis HEB220.

Como foi anteriormente dito, estes tirantes têm como objectivo não só a redução dos deslocamentos horizontais através de um aumento da rigidez controlando e evitando que a estrutura tenha deslocamentos exagerados.

Como acção exterior foi considerado novamente o espectro sísmico apresentado anteriormente.

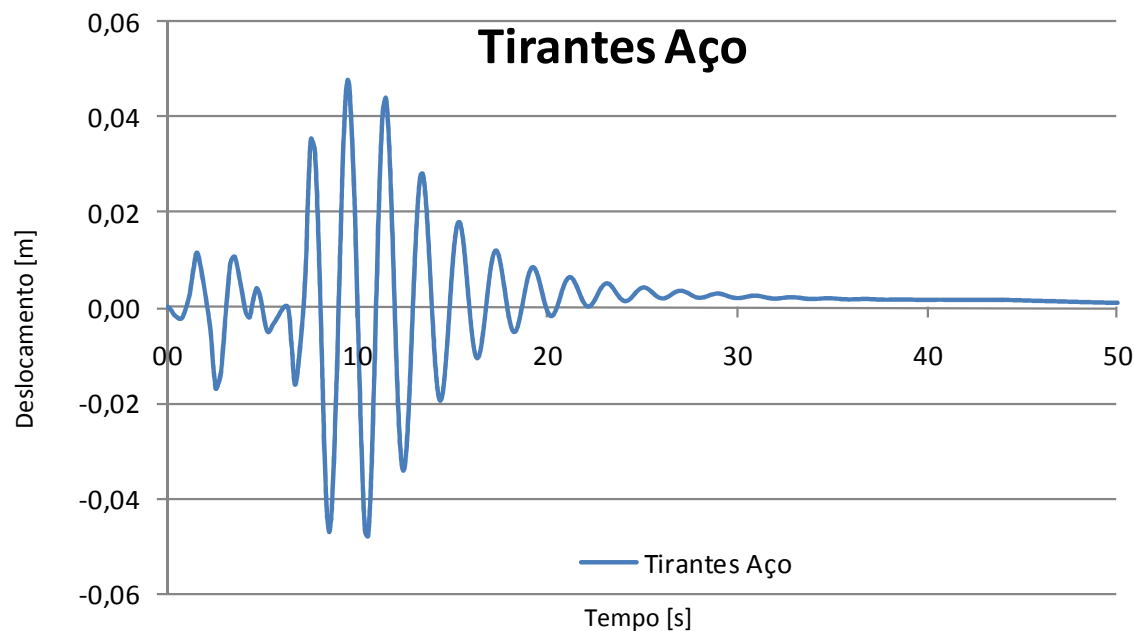


Figura 3.7- Time-History – Estrutura com tirantes de aço

Como primeira conclusão após correr esta análise, e de acordo com o esperado, os deslocamentos são inferiores aos da primeira estrutura devido à introdução de tirantes, tendo como deslocamento máximo 0.0450m que em comparação com o ensaio anterior corresponde a um decréscimo de 65% dos deslocamentos máximos. Se for tido em conta que o diâmetro dos cabos de aço utilizados é de 15mm verifica-se que os tirantes actuam bastante eficazmente na estrutura. A presença destes permite reduzir os deslocamentos horizontais através de uma maior rigidez e de um encaminhamento mais directo dos esforços para os apoios, no entanto à custa de uma maior rigidez para a estrutura.



### ENSAIO 3 – PORTICO DE DOIS ANDARES COM TIRANTES SMAs

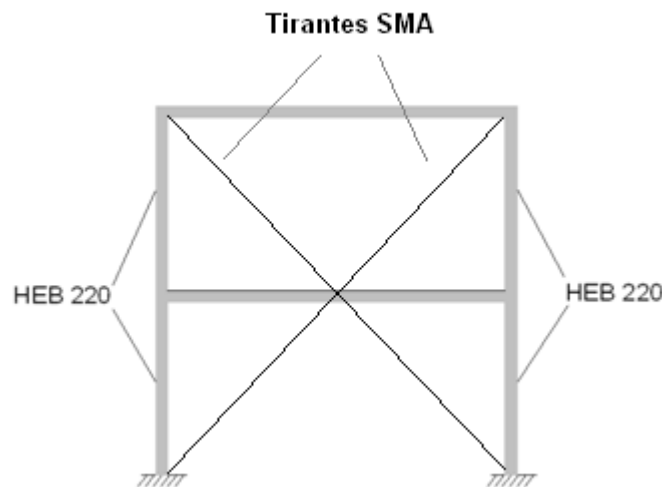


Figura 3.8 –Modelo Ansys – Pórtico 2 andares com tirantes SMA

O modelo com tirantes SMA tem uma estrutura algo diferente dos dois modelos anteriormente apresentados.

Uma vez que o Ansys apenas permite associar o material SMA a determinado tipo de elementos, os tirantes não puderam ser modelados como no modelo anterior através de um elemento *“link”*. Como tal adoptou-se um elemento *“plane182”*.

A escolha de um elemento *“plane”* tem consequências no resto do modelo. Para se poder obter a secção pretendida para o diâmetro do cabo SMA foi necessário passar de uma secção circular para uma secção rectangular. O Ansys assume que a espessura dos elementos é de uma unidade, o que reduz drasticamente o valor do lado do rectângulo necessário para atingir a secção de um tirante de 15mm de diâmetro.

Desta forma, ao ser executado o modelo, foram criados 4 novos pontos que serviram para criar o tirante em forma rectangular. Os tirantes são então modelados como rectângulos que unem as extremidades da estrutura.

Em baixo, na Figura 3.9 é possível observar os resultados da análise transiente efectuada à estrutura com recurso a elementos SMA. Novamente a estrutura foi sujeita à aceleração sísmica anteriormente utilizada. Como é possível observar, a estrutura apresenta como valor máximo de deslocamento horizontal 5.5cm, valor que se situa entre o deslocamento máximo da estrutura analisada sem tirantes e com tirantes de aço.

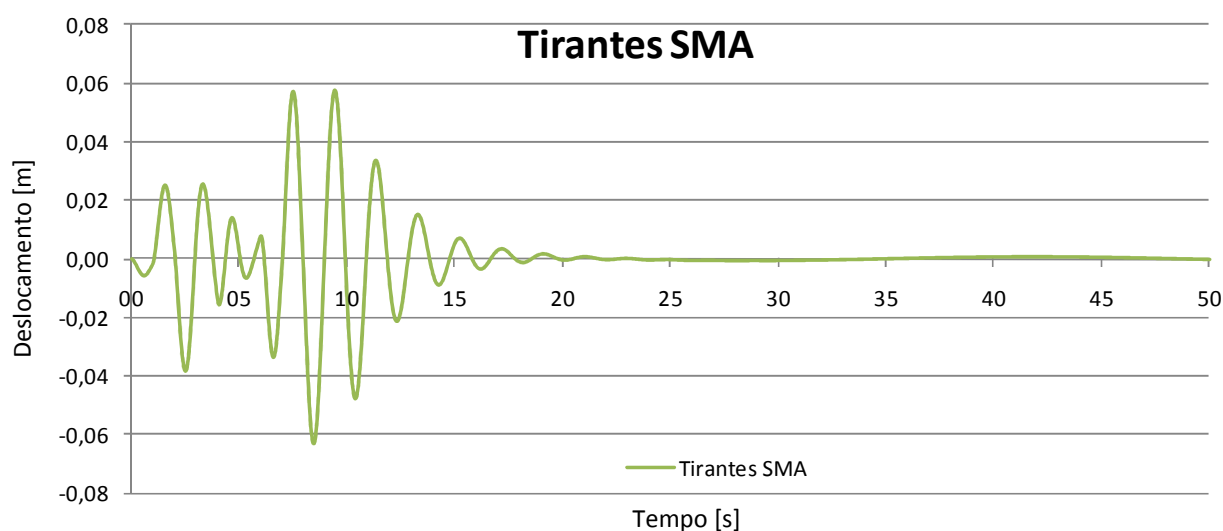


Figura 3.9- Time-History – Estrutura com tirantes SMA

## 5. Conclusão

No gráfico da Figura 3.10 (a tabela encontra-se no anexo III) é possível visualizar a sobreposição dos resultados das três análises realizadas.

Foram extraídos os dados do software Ansys para uma tabela Excel, a partir da qual foi possível sobrepor os resultados em forma gráfica.

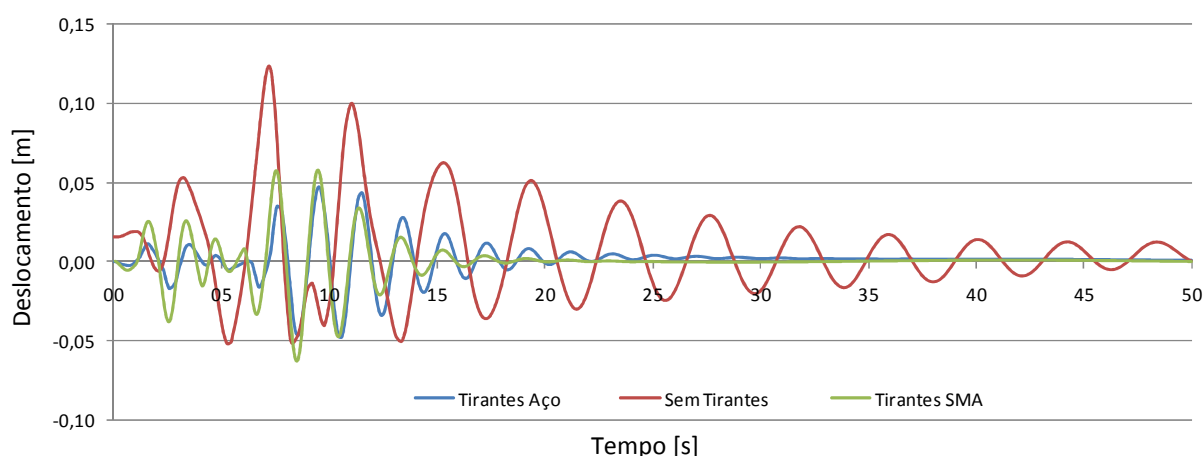


Figura 3.10- Time-History – Sobreposição 3 simulações

Como é possível visualizar, a estrutura com tirantes de aço, a azul na Figura 3.10, é a que apresenta menor deslocamento máximo, seguindo-se da estrutura com tirantes SMA e por ultimo a estrutura sem tirantes.

Comparando a estrutura sem tirantes e a estrutura com tirantes de aço, era já esperado e sabido que esta ultima iria apresentar resultados mais eficazes, no entanto a sua análise foi necessária para um enquadramento de resultados da estrutura com tirantes SMA.

Ao analisar a estrutura com tirantes SMA e comparando-a com as restantes, verifica-se que é mais eficaz ao longo de toda a análise que a estrutura sem tirantes (como já era esperado), apresentando no entanto deslocamentos máximos superiores à estrutura com tirantes de aço. Tal facto deve-se a que ao serem comparados os tirantes, verifica-se que os elementos de aço têm um módulo de elasticidade de 210 MPa, contrastando com uns 37.3 MPa dos SMAs, o que garante à estrutura com tirantes de aço uma maior rigidez, e como tal, melhor comportamento em termos de deslocamentos máximos.

No entanto ao serem comparados os resultados ao longo do tempo, é possível verificar que a estrutura com elementos SMAs apresenta um melhor amortecimento, e apesar de um maior deslocamento máximo pontual, consegue rapidamente ser mais eficaz ao fim de alguns ciclos que a estrutura com tirantes de aço. Este facto deve-se à maior capacidade de dissipação de energia por parte dos elementos SMAs, que contrariamente ao aço, dissipa energia entre os ciclos para além de garantir rigidez adicional à estrutura.

Sendo que uma elevada rigidez numa estrutura nem sempre é favorável quando esta é sujeita a acções dinâmicas, o recurso a elementos SMAs provou ser válido para o controlo de vibrações, garantindo uma dissipação de energia entre ciclos sem elevar demasiado a rigidez da estrutura.

De forma a maximizar a actuação do material com memória de forma é possível adoptar um processo de pré-esforço do mesmo, sendo que a tensão aplicada terá de ser suficiente para que o material entre na sua fase martensítica.

Uma vez na fase martensítica, o material terá um deslocamento instantâneo maior que teria na fase austenítica, no entanto dissipará imediatamente energia, pelo que a oscilação imediatamente a seguir terá um pico inferior, levando a um amortecimento mais célere.

Pode-se por fim concluir que a aplicação de um material com memória de forma em preterimento de um material como o aço não produz melhores resultados em termos de redução de deslocamentos máximos, visto que o módulo de elasticidade é consideravelmente superior no caso deste último, facto esse que faz com que as frequências naturais aumentem consideravelmente. A utilização de materiais com memória de forma resulta num amortecimento mais rápido da estrutura, à custa de uma menor rigidez e por conseguinte à custa de uma frequência natural inferior quando comparado a uma estrutura com tirantes de aço.

## Referências

- Alberta, U. o. (2001). *University of Alberta - ANSYS Tutorials*. Obtido em 2008, de University of Alberta - ANSYS Tutorials : <http://www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys/>
- Auricchio, F., Taylor, R. L., & Lubliner, J. (1997). Shape-memory alloy: macromodelling and numerical simulations of the superelastic behavior. *Computer Methods Appl. Mech. Engrg.* (146), 281-312.
- Chopra, A. K. (2001). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. New Delhi: Prentice-Hall of India.
- Clark, P., Aiken, I., Kelly, J., Higashino, M., & Krumme, R. (1995). Experimental and analytical studies of shape memory alloy dampers for structural control. *Proceedings of passive damping*, 00.
- DesRoches, R. and Delemont, M. (2002) Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys. *Engineering Structures*
- Dolce, M., & Cardone, D. (2001). Mechanical behavior os shape memory alloys for seismic applications 2. Austenite NiTi wires subjected to tension. *International Journal of Mechanical Sciences* (43), 2657-2677.
- Dolce, M., Cardone, D., & Marnetto, R. (2000). Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 945-968.
- Dolce, M., Cardone, D., & Marnetto, R. (2001). SMA re-centering devices for seismic isolation of civil structures. *Proceedings of SPIE* (4330), 238-249.
- Duerig, T. (1990). *Engineering aspects of shape memory alloys*. London: Butterworth-Heinemann.
- Engineering, C. U.-S. (2002). *Ansys: short course*. Obtido em 2008, de Ansys: short course: <http://instruct1.cit.cornell.edu/courses/ansys/>
- Flor, S (2005). Tese de doutoramento: Simulación numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma
- Han, Y., Li, Q., Li, A., Leung, A., & Lin, P. (2003). Structural vibration control by shape memory alloy dumper. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (32), 483-494.
- Indirli, M. (2001). Demo application of shape memory alloy devices: The rehabilitation of S. Georgio Church Bell Tower. *Proceedings of SPIE* (4330), 262-272.
- Laurence, K. L. (2005). *Ansys Tutorial Release 9.0*. Canonsburg: Schroff Development Corporation.
- Li, H., Liu, M., & Ou, J. (2004). Vibration mitigation of stay cable with one shape memory alloy damper. *Structural Control and Health Monitoring* (11), 1-36.

López, S. d. (2005). *Simulación Numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma*. Tarragona: Universidad Politécnica de Catalunya.

Madenci, E., & Guven, I. (2006). *The Finite Element Method and Applications in engineering using ANSYS*. New York: Springer Science+ Business Media, LLC.

McGavin, G., & Guerin, G. (2002). Real-time seismic damping and frequency control of steel using Nitinol wire. *Proceedings of SPIE* (4696), 176-184.

Paiva, A., & Savi M.A (1999). Sobre os modelos constitutivos com cinética de transformação assumida para ligas com memória de forma. *XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*.

PEER, 2009 [www.peer.berkeley.edu](http://www.peer.berkeley.edu)

R. DesRoches and B. Smith. Shape memory alloys in seismic resistant design and retrofit: a critical review of the state of the art, potential and limitation. In press on Journal of Earthquake Engineering, August 2002

Saadat, S., Salichs, J. N., Bar-on, I., Suzuki, Y., & Masuda, A. (2002). An overview of vibration and seismic application of NiTi shape memory alloy. *Smart Materials and Structures* (11), 218-229.

SAES Getters Group , 2009 [www.shape-memory-alloys.com](http://www.shape-memory-alloys.com)

Sakai, Y., Kitagawa, Y., Fukuta, T., & Iiba, M. ( 2003). Experimental study on enhancement of self restoration of concrete beams using SMA wire. *Proceeding of SPIE* , 238-45.

Santos & Cismasiu, 2008 Comparison Between Two SMA Constitutive Models for Seismic Applications

Seelecke, S. (2002). Modeling the Dynamic Behavior of Shape Memory Alloys. *International Journal of Non-Linear Mechanics* (Special Issue on Hysteresis and its Implications in Mechanics), 00.

Song, G. (2006). Applications of shape memory alloys in civil structures. *Engineering Structures* (28), 1266-1274.

Stolarski, T., Nakasone, Y., & Yoshimoto, S. (2006). *Engineering Analysis with Ansys Software*. Burlington: Elsevier Butterwoth-Heinemann.

Tamai H, Kitagawa Y. Pseudoelastic behavior of shape memory alloy wires and its application to seismic resistance member for building. *Computational Materials Science* 2002;25:218–27.

Tanaka, K., Kobayashi, S., & Sato, Y. (1986). Thermo-mechanics of transformation pseudo-elasticity and shape memory effect in alloys. *International Journal of Plasticity* (2), 59-72.

# ANEXOS





## ***Mapa de Anexos:***

Anexo I – Características SMAs do fabricante “SAES Group”

Anexo II – Ensaios Matlab

Anexo III – Ensaios Ansys

Anexo IV – Análise das referências utilizadas